



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Evaluación del efecto del tipo y contenido de ceniza utilizada como fíller en la resistencia a la acción del agua de las mezclas asfálticas

Treball realitzat per:

Andrés Zaro Campaner

Dirigit per:

Rodrigo Miró Recasens

Màster en:

Enginyeria de Camins Canals i Ports

Barcelona, 16 de juny del 2017

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas aquellas personas que de una manera u otra han hecho posible que esta tesina vea la luz y se haya llevado a cabo de la mejor forma posible.

Gracias a mi tutor el Dr. Rodrigo Miró, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto y de aprender la forma de trabajar en el mundo del laboratorio y de la investigación, así como por su consejo y por los conocimientos que me ha transmitido.

Gracias al jefe del laboratorio de mezclas asfálticas José Amorós, y al técnico del laboratorio Jordi Martín, cuya ayuda y guía ha hecho posible la correcta ejecución de todas las pruebas y ensayos.

Gracias a María Herrero por proporcionarme los datos de partida para esta tesina, así como por su ayuda en el laboratorio cuando la requerí.

Y gracias a todos los que, tanto de forma directa o indirecta, han ayudado a la realización de esta tesina y que han hecho de esta una experiencia grata y enriquecedora.

Resumen

La siguiente tesina se encuentra enmarcada dentro del conjunto de los estudios de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Dentro de los deterioros principales que producen una cantidad mayor de pérdidas en las capas de rodadura se encuentra la abrasión. La pérdida de material viene causada por el paso de neumáticos, y sus consecuencias son tanto la disminución de confort y seguridad, como el gasto económico que supone su mantenimiento y rehabilitación.

El principal objetivo de este estudio, es determinar la viabilidad de dos tipos de ceniza, residuos de la industria papelera, para ser utilizadas como fíller en mezclas bituminosas en caliente. Con el fin de juzgar la viabilidad de su uso, se va a evaluar el daño por humedad que sufren probetas fabricadas estas cenizas.

Este daño será comparado al que sufren otras probetas cuando son fabricadas utilizando filleres convencionales, los cuales se utilizan hoy en día y que proporcionan unas propiedades aceptables.

Palabras clave: mezcla bituminosa en caliente, abrasión, daño por humedad, fíller, ceniza, ensayo cántabro

Abstract

The following dissertation is an important part of the studies undertaken at the College of Civil Engineering of Barcelona, at the Universitat Politècnica de Catalunya.

One of the main reasons of tread layers' deterioration is abrasion. The loss of material is caused by the passage of tires, and its consequences are both the loss of comfort and safety, and the economic expense that supposes its maintenance and rehabilitation.

The main objective of this study, is to determinate the viability of two types of ash, waste from the paper industry, to be used as filler in hot bituminous mix. In order to judge its viability, they are going to be used to fabricate test specimens, and then the damage done by humidity will be tested.

The damage those test specimens suffer, will be compared to other test specimens that will be fabricated with conventional fillers, which are used widely today and that provide acceptable characteristics.

Key words: hot bituminous mix, abrasion, humidity damage, filler, ash, cántabro test

Índice

1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
3. Estado del conocimiento.....	4
4. Plan de trabajo	14
4.1. Metodología.....	14
4.2. Materiales	14
4.3. Ensayos.....	16
4.3.1. Concentraciones críticas	16
4.3.2. Fabricación de probetas	19
4.3.3. Densidad aparente y porcentaje de huecos	22
4.3.4. Ensayo cántabro.....	23
5. Resultados.....	26
5.1. Densidad aparente y porcentaje de huecos	26
5.2. Ensayo cántabro.....	36
6. Conclusiones.....	44
7. Futuras líneas de investigación.....	45
8. Referencias bibliográficas	46
9. Índice de tablas	48
10. Índice de figuras	49
11. Anejos.....	51

1. Introducción

Las primeras calles pavimentadas fueron encontradas en Ur (Iraq), y datan de 4000 años antes de la era común. Mucho han cambiado desde entonces, tanto las calles mismas como el tráfico que las recorre.

Ante la gran inversión que supone a día de hoy una infraestructura como una carretera o una autopista, es importante asegurarse que ésta se mantendrá en buen estado el máximo tiempo posible. Es por ello que un gran número de estudios se realizan a día de hoy con el fin de mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas, para que resistan de la mejor manera posible el paso constante de vehículos.

Dentro de los deterioros principales que producen una cantidad mayor de pérdidas en las capas de rodadura se encuentra la abrasión o “ravelling”. La pérdida de material viene causada por el paso de neumáticos, y sus consecuencias son tanto la disminución de confort y seguridad, como el gasto económico que supone su mantenimiento y rehabilitación.

El Instituto de Asfalto (asociación internacional de productores de asfalto de petróleo) define el concepto “ravelling” como la pérdida progresiva de materia de la superficie debida a la erosión y/o abrasión del tráfico.

Si la resistencia de los áridos a la abrasión no es adecuada, se genera una pérdida de la textura que requiere la carretera para mantener la resistencia al desplazamiento cuando se circula a grandes velocidades. En otras palabras, se genera una reducción importante del factor de seguridad.



Figura 1 - Ravelling en carretera [1]

En las capas de rodadura el ravelling comienza a aparecer lentamente, pero es una vez pasados entre siete y nueve años de la puesta en obra de la carretera que comienza a desarrollarse con mayor rapidez. Esto es debido al efecto dominó. Cuando una partícula es desprendida, las adyacentes pierden cohesión, pues se hallan con un punto de apoyo menos.

Si las partículas no se encuentran perfectamente envueltas por el ligante, éste no proporciona la adherencia adecuada, y dichas partículas también acabarán por separarse.

Varios autores han estudiado las principales causas de la aparición del “ravelling” de forma prematura. La aparición de este a corto plazo se debe a una intensa fuerza cortante que se da en el contacto entre los neumáticos y el pavimento [2], así como a la cantidad de roca débil existente en la mezcla que junto a condiciones meteorológicas adversas provocan un incremento en la superficie abrasionada por el tráfico [3]. Sin embargo se determinó que la abrasión a largo plazo era causada por el envejecimiento del ligante por acciones meteorológicas [4].

El fíller juega un importante papel en la resistencia a la abrasión de las mezclas bituminosas en caliente, especialmente cuando hay daño por humead. La elección y dosificación correcta del fíller resultan factores críticos, pues determinan el comportamiento de la mezcla asfáltica y su resistencia.

El principal objetivo de este estudio, es determinar la viabilidad de dos tipos de ceniza, residuos de la industria papelera, para ser utilizadas como fíller en mezclas bituminosas en caliente. Con el fin de juzgar la viabilidad de su uso, se va a evaluar el daño por humedad que sufren probetas fabricadas con éstas cenizas y se comparará con el daño que sufren otras probetas cuando son fabricadas utilizando fílleres convencionales, los cuales se utilizan hoy en día y que proporcionan unas propiedades aceptables.

2. Objetivos

El presente trabajo trata de la realización de un estudio sobre la sensibilidad al agua que presentan las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con cenizas procedentes de la industria papelera como fíller. Se evalúa la pérdida de material que sufren las mezclas al someterse al ensayo cántabro en dos casos: cuando la mezcla ha sido sometida a inmersión en agua a 60°C durante 24h, y cuando la mezcla no ha sido sometida a inmersión alguna.

Los objetivos se definen específicamente como:

Realización de una revisión bibliográfica referente al efecto del fíller en mezclas bituminosas en caliente, así como del uso de materiales alternativos como fíller y cómo estos afectan a las propiedades de las mezclas asfálticas.

Estudiar y comparar cómo distintos fílleres afectan a la resistencia a la humedad de una misma mezcla patrón UCL.

Juzgar en que cantidades resulta apto o no el uso de las cenizas estudiadas como fíller en mezclas bituminosas en caliente.

3. Estado del conocimiento

El fíller desempeña un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente. Dicho comportamiento depende de las características del fíller, como son su naturaleza, finura, actividad y proporción. El fíller, cuando se mezcla con el ligante da lugar a lo que se denomina mástico. Los huecos dejados por las partículas más gruesas de la mezcla son rellenados por el fíller, pero ésta no es su función principal.

Son varios los tipos de fíller que se utilizan en las mezclas bituminosas, desde el polvo mineral que puede ser contenido en los áridos, procedente de su trituración, hasta un producto comercial en estado de polvo, cemento, cenizas volantes o polvo calizo. Se está estudiando también la posibilidad de utilizar varios productos derivados de otras actividades industriales que a día de hoy se consideran residuos. Estos últimos requieren un gran número de pruebas, no sólo para ver su comportamiento en las mezclas bituminosas, sino también para asegurarse de que son seguros, proporcionan mezclas duraderas y no causarán contaminación alguna en el medio ambiente.

Varios autores coinciden en que el efecto del fíller está marcado por la relación volumétrica y/o por la interacción físico-química del fíller con el betún [5,6,7,8]. Con el fin de mejorar las propiedades de las mezclas, es habitual la incorporación de betunes modificados y/o el uso de modificadores de fíller como cal muerta (Ca(OH)_2) entre otros.

A pesar de su uso habitual, se ha visto que el uso de estos modificantes pueden tener efectos diferentes en las distintas propiedades que caracterizan la mezcla (densidad, contenido en huecos, módulo elástico, resistencia a la fractura, a la fatiga, a la fluencia, al agua, al hielo...) según el fíller y el betún utilizados. El efecto de dichos modificantes es extremadamente complejo, y a día de hoy todavía no se conoce totalmente cómo funcionan.

Es por ello que se realizan un gran número de estudios al respecto, tanto con los filleres más convencionales y utilizados hoy en día, como con otros materiales que podrían desempeñar las mismas funciones con igual o mayor eficiencia. Entre estos materiales se encuentran, entre otros, la escoria de horno, residuos de fósforo y cenizas de la industria papelera.

En la universidad de Parma, Montepara et al. (2011) estudiaron diferentes mezclas asfálticas en las que se utilizó cal muerta (HL) como aditivo. Para contrastar los resultados, se fabricaron 16 mezclas diferentes, utilizando cuatro betunes: dos modificados con polímeros (MR y ML) y dos sin modificar (N2 y NV); y cuatro filleres: caliza (Limestone), arcilla (Clay), caliza más cal muerta y arcilla más cal muerta.

Hallaron que las mezclas con caliza presentan un módulo de elasticidad considerablemente mayor que las fabricadas con arcilla, y que la adición de cal muerta hace variar los valores en función del fíller y tipo de betún utilizados, como se ilustra en la figura 2.

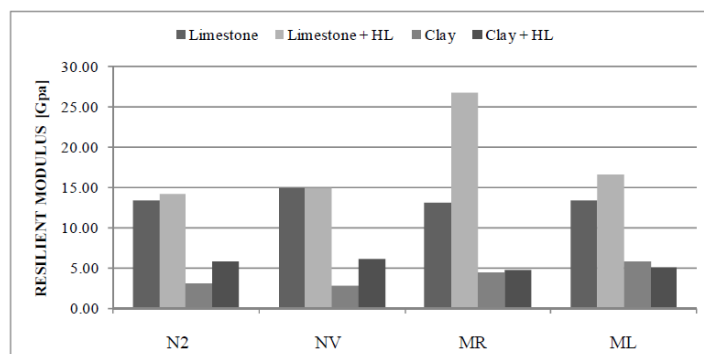


Figura 2 - Módulo de elasticidad de las distintas mezclas [9]

Se observó también que el tipo de fíller y/o la presencia de cal muerta en la mezcla no influyen en la deformación por fluencia. Sin embargo la acumulación de daño depende mayormente del tipo de betún utilizado y no del fíller.

La naturaleza del fíller resultó no influir en la resistencia a tracción de la mezcla cuando ésta se fabrica con betún no modificado, pero en el caso contrario el fíller si influye. Sin embargo la densidad de energía de fractura y la energía de deformación disipada si dependen de la naturaleza del fíller, indistintamente del betún utilizado, siendo mayor cuando se utiliza la arcilla, como se puede apreciar en la figura 3.

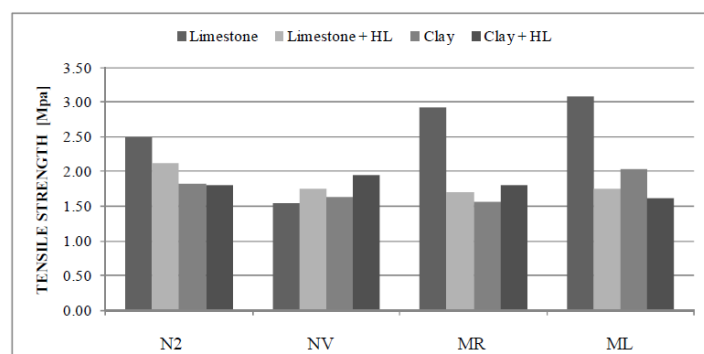


Figura 3 - Resistencia a la tracción de las distintas mezclas [9]

La cal muerta se encuentra principalmente compuesta por hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), y se obtiene hidratando cal viva (óxido de calcio, CaO). Su uso está muy extendido en los Estados Unidos, donde se utiliza cuando el daño por humedad y/o por congelación suponen un problema importante, reduciendo el envejecimiento de la mezcla y endurecimiento la mezcla, lo que se a su vez aumenta la durabilidad del mástico. Su utilización también se encuentra especificada en la norma europea EN 459-1 para construcción y obra civil.

Ante el gran uso que se hace de la cal muerta como aditivo y de las evidentes mejoras que tiene el uso de ésta en las mezclas asfálticas, Lesueur et al. (2012) realizaron un estudio en Bélgica respecto a cómo este aditivo actúa en las mezclas bituminosas en caliente.

Como ya se ha dicho, el principal interés del uso de cal muerta se debe al efecto que tiene sobre el daño por humedad y la resistencia a la helada, pero este aditivo también puede mejorar otras propiedades de las mezclas bituminosas en caliente, por lo que se considera un aditivo multifuncional que mejora la durabilidad. Por desgracia, medir la durabilidad de una

muestra en laboratorio es muy difícil debido a los numerosos modos de fallo que la mezcla asfáltica puede sufrir.

Es bien sabido que los áridos silíceos presentan las peores propiedades adhesivas respecto al betún. Esto se debe a que únicamente las superficies catiónicas se unen fuertemente con los átomos de sílice. La cal muerta permite la precipitación de iones de calcio en el árido, favoreciendo la adhesión con el betún. El carbonato de calcio precipita en presencia de agua, lo que crea una superficie más rugosa que favorece la adhesión con el betún todavía más.

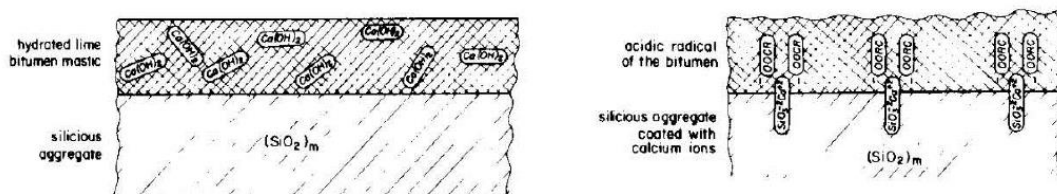


Figura 4 - Efecto de la cal muerta en árido silíceo [11]

La cal muerta también absorbe el agua que pueda haber presente en los fílleres de origen arcilloso, evitando que éstos creen una barrera de agua entre el betún y el árido.

Estos efectos químicos de la cal muerta también retardan el envejecimiento de la mezcla. Este es el motivo por el que las mezclas en las que se ha utilizado este aditivo presentan una mayor resistencia al daño de la humedad y del hielo.

Finalmente, la cal muerta presenta una porosidad mucho mayor que los fílleres minerales. Esto es porque las partículas de cal muerta son muy porosas, mientras que la porosidad de los fílleres minerales es despreciable, como se ilustra en la figura 5.

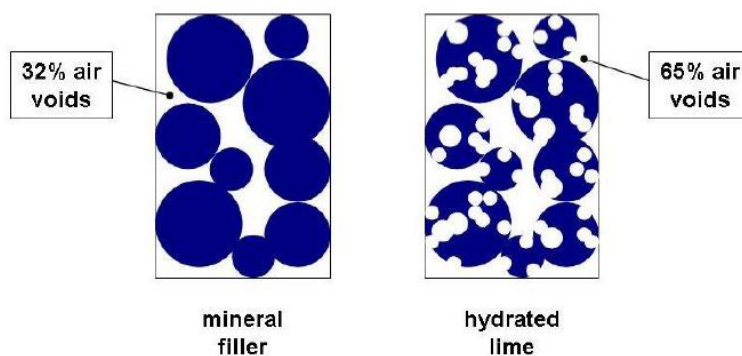


Figura 5 - Porosidad del filler mineral (izquierda) y de la cal muerta (derecha) [10]

Del mismo modo que son de gran importancia las propiedades del fíller y el betún utilizado, también lo son las cantidades en las que se usan. En Francia, Buannic et al. (2012) realizaron un estudio en el que quedó patente la importancia de la correcta dosificación del fíller. Elaboraron tres mezclas diferentes utilizando dos filleres: caliza (W100 μ), con concentraciones de 30% y 50% en volumen; y humo de sílice (S) con concentraciones de 30% en volumen. Como se acostumbra a hacer en la mayoría de estudios, se contaba con una cuarta mezcla sin fíller para contrastar resultados.

Las mezclas que contienen de humo de sílice presentaban un módulo elástico mayor que las otras, dejando patente el efecto que tiene en la mezcla el tipo de fíller utilizado. Sin embargo, al estudiar las mezclas a fatiga, observaron que a media que la cantidad de fíller aumentaba, la resistencia disminuía. Así pues, independientemente del fíller, para las dos mezclas con una concentración del 30% en volumen se obtuvieron resultados muy parecidos, mientras que las que contaban con una concentración del 50% presentaban la menor resistencia. Esto se puede apreciar en la figura 6.

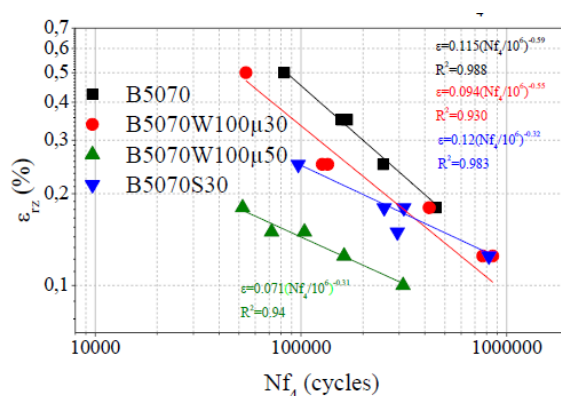


Figura 6 - Curvas de Wöhler para los 4 materiales [12]

Así queda patente que añadir fíller a la mezcla sin criterio resulta contraproducente, no sólo porque se gasta material, también porque la mezcla final resulta ser de menor calidad que si se utilizara el polvo en una cantidad menor.

Otros autores prefieren centrar sus esfuerzos en el estudio de nuevos posibles fílleres. Una sola empresa siderúrgica puede generar cada día entre 70 y 80 toneladas de escoria de horno de arco eléctrico. En Turquía, Yilmaz y Sutas (2012) decidieron estudiar la posibilidad de reutilizar este deshecho como fíller para mezclas bituminosas en caliente.

Al compararse la densidad y el contenido en huecos de las mezclas asfálticas fabricadas utilizando escoria de horno (FeCr) con otras en la que se utilizó un fíller convencional (caliza), se observó que ambas presentaban una densidad muy similar (figura 7), pero sin embargo, las mezclas fabricadas con escoria de horno presentaban un porcentaje de huecos significativamente mayor respecto a la otra mezcla (figura 8).

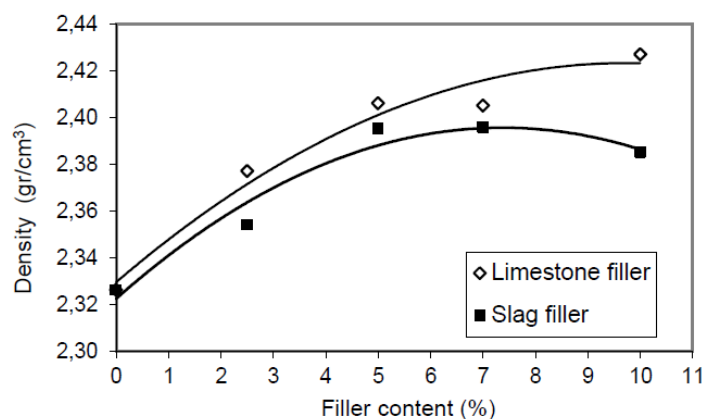


Figura 7 - Densidad frente a concentración de fíller [13]

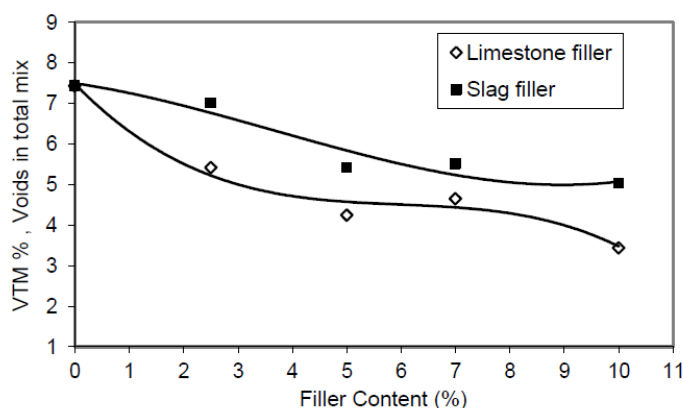


Figura 8 - Porcentaje de huecos frente a concentración de fíller [13]

Las probetas fabricadas con FeCr fueron sometidas a un ensayo de fluencia dinámico, donde sometidas a una carga axil cíclica, se midieron las deformaciones que sufrían las muestras. Dicho ensayo dejó de nuevo patente la importancia de la correcta dosificación de fíller en las mezclas asfálticas en caliente, pues hasta cierta cantidad el fíller mejora las propiedades de la mezcla, pero un exceso del fino polvo puede suponer una disminución significativa de cualidades de la mezcla, como se observa en la figura 9.

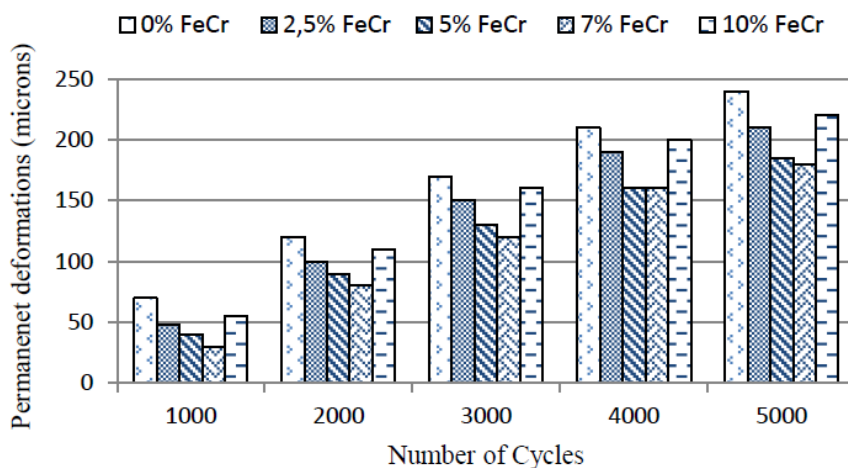


Figura 9 - Relación entre deformación permanente y ciclos de carga [13]

En Irán, Poursorkhabi y Osgouei (2012) también decidieron estudiar el potencial de otro residuo como fíller para mezclas bituminosas en caliente. En este caso se trata de los residuos de las minas de fósforo, muy abundantes en el país. Los residuos de fosforo, en su mayoría P_2O_5 , tienen un grave impacto en el medio ambiente, y poder reutilizar estos restos de la minería de algún modo ayudaría a reducir este impacto.

Las mezclas fabricadas con los residuos de fosfato presentaban una mayor densidad que las fabricadas de referencia, en las que se utilizó caliza como fíller. También presentaban una penetración considerablemente menor, probablemente debido a la dureza de las partículas de fosfato en la escala de Mohs. La penetración tras ensayo en pista de las mezclas fabricadas con P_2O_2 era un 60% menor respecto a las de referencia.

En la Universidade da Coruña, Pasadín et al. (2015) estudiaron la resistencia a la humedad que presentaban las mezclas asfálticas en caliente al ser fabricadas con cenizas volantes o residuos inorgánicos procedentes de la industria papelera. Para evaluar la resistencia al agua, se utilizó la norma UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2006a), en la que se calcula el ratio de resistencia a tracción (TSR, %), que es la relación entre la resistencia a tracción de las muestras sometidas a inmersión en agua a 40°C durante tres días (ITS_W) y la resistencia a tracción de las muestras que no han sido mojadas (ITS_D).

$$TSR = \frac{ITS_W}{ITS_D} \times 100 \quad (3.a)$$

La norma indica que se requiere $TSR \geq 80\%$ para que se cumplan las especificaciones de PG-3 para el betún utilizado.

Water content, PH, conductivity, water resistance results and volumetric properties at optimum asphalt content								
Filler	Water content	pH	Conductivity	Water resistance results and volumetric properties at optimum asphalt content				
				ITS _D (MPa)	ITS _W (MPa)	TSR (%)	Vm (%)	VMA (%)
Dregs	4.1%	9.09	2510 µS/cm	1.36	0.14	9.9	7.53	17.20
Biomass fly ash	1.6%	6.74	1754 µS/cm	1.44	0.83	57.9	8.50	18.24
Commercial limestone	0.1%	6.57	76.9 µS/cm	2.14	1.72	80.6	6.05	15.90

Tabla 1 - Resultados utilizando la cantidad de betún óptima respecto a la caliza [15]

Únicamente el fíller convencional, el polvo de caliza, cumple dicha restricción. Los residuos inorgánicos presentaron un pésimo resultado, inferior al 10%. Ante el valor obtenido por las cenizas volantes, se repitió el ensayo, pero esta vez utilizando la cantidad de betún óptima respecto a las cenizas y no a la caliza, como se había hecho en el ensayo anterior.

Water resistance results and volumetric properties at bitumen content higher than the optimum asphalt content for mixtures made with biomass fly ash as filler.

Asphalt content	ITS _D (MPa)	ITS _W (MPa)	TSR (%)	Vm (%)	VMA (%)
4.40%	1.39	0.93	67.1	7.7	17.7
4.55%	1.52	1.01	66.6	6.8	17.2

Tabla 2 - Resultados de las mezclas fabricadas con cenizas volantes cuando la cantidad óptima se betún se calcula respecto a las mismas cenizas [15]

Al ajustar la cantidad de betún los resultados mejoraron, pero sin llegar al umbral establecido por la norma.

También se estudiaron las propiedades mecánicas de las mezclas. Se observó que el módulo elástico de las tres mezclas era bastante similar, especialmente el de los especímenes fabricados con caliza y los fabricados con cenizas volantes (figura 10). En lo que respecta a la resistencia a deformación permanente, todas las mezclas mostraron un buen comportamiento, siendo las cenizas volantes las que presentan una mayor deformación permanente, pero igualmente inferior a las de las mezclas convencionales (figura 11).

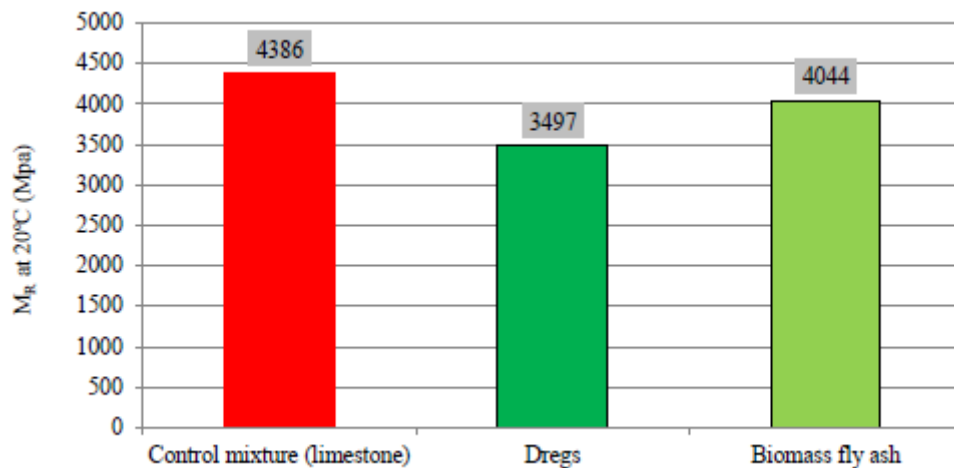


Figura 10 - Módulo elástico de las distintas mezclas [15]

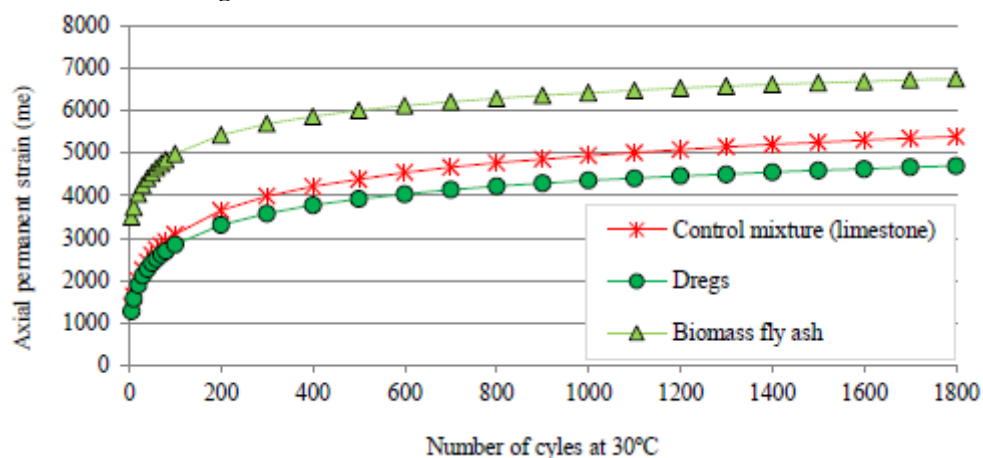


Figura 11 - Resistencia a deformación permanente de las distintas mezclas [15]

El estudio concluyó que, dado que las cenizas volantes presentan una gran cantidad de cal muerta, la presencia de la cual es muy beneficiosa cuando se trabaja con árido húmedo de origen silíceo, este tipo de fíller podría ser utilizado en mezclas asfálticas en frío, abriendo así una nueva línea de investigación.

En la Universitat Politècnica de Catalunya, Pérez et al. (2008), estudiando el efecto que tienen la naturaleza del fíller y la cantidad de éste en el comportamiento de mezclas bituminosas, dejaron patente la importancia de dosificar el fíller en mezclas asfálticas según la concentración crítica de cada fíller, y no por peso.

Al comparar los resultados obtenidos al someter varias mezclas fabricadas con fílleres diferentes al ensayo Cántabro, se observó que los resultados para la misma relación C_v/C_s eran parecidos y fáciles de comparar, presentado un punto óptimo para una relación comprendida entre 0.5 y 1 (figura 12). Sin embargo, lo que ocurría si se consideraban las relaciones fíller/betón en peso era muy diferente, las curvas obtenidas eran completamente dispares y la relación óptima fíller/betón dependía de las características del fíller (figura 13).

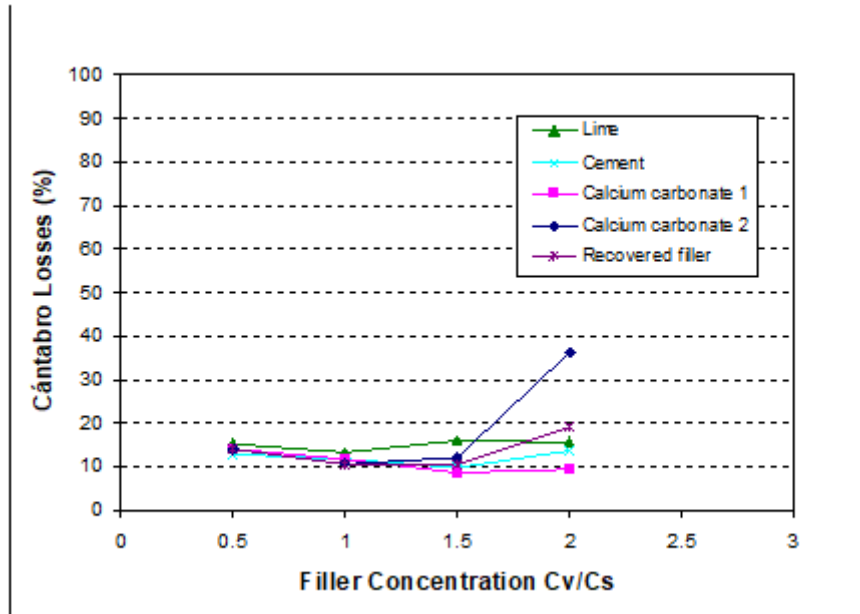


Figura 12 - Pérdidas al Cántabro respecto concentraciones volumétricas [16]

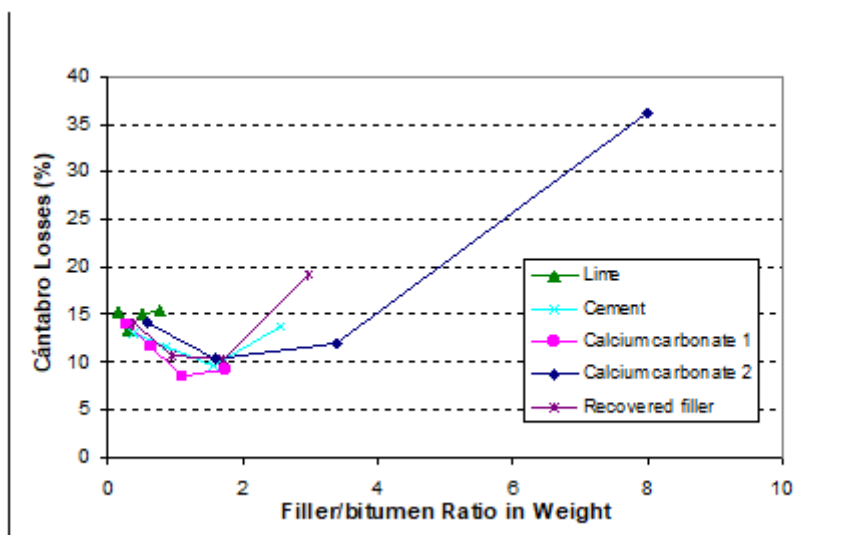


Figura 13 - Pérdidas al Cántabro respecto concentración fíller/betún en peso [16]

El efecto de cada tipo de fíller se puede observar mejor al contrastar como la relación Cv/Cs afecta el porcentaje de huecos (figura 14). Fílleres con mayor Cs (ej. Carbonato cálcico 2, CaCO_3) proporcionan un mástico más denso que rellena más huecos. Además, estos fílleres tienen una relación mayor fíller/betún para la misma relación Cv/Cs. El efecto contrario se observó en los fílleres con menor Cs (ej. cal viva, CaO), pues éstos hacen reducir muy poco el porcentaje de huecos al aumentar la relación Cv/Cs.

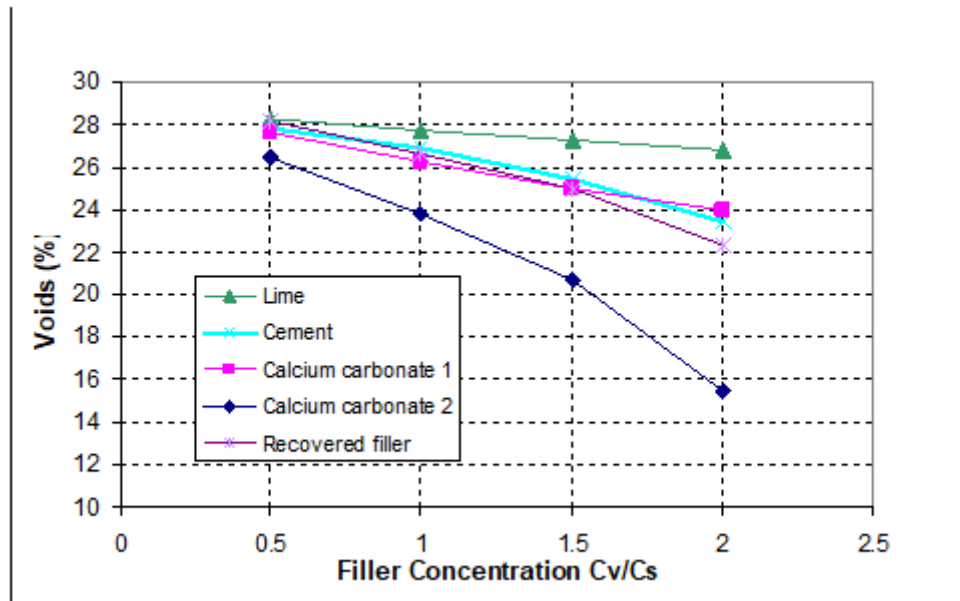


Figura 14 - Porcentaje de huecos respecto a relación volumétrica del contenido en fíller [16]

También en la Universitat Politècnica de Catalunya, Herrero (2017) estudia la viabilidad del uso de cenizas de la industria papelera como fíller en mezclas bituminosas en caliente, y que efecto tienen en la resistencia a la humedad de las mezclas asfálticas.

Estas cenizas son los residuos resultantes de la combustión de rechazos de pulper, arenas y lodos de depuradora, procedentes del reciclado de papel y que previamente han sido tratados, que proporciona el combustible para el reciclado de papel. Las cenizas provienen de la empresa SAICA, situada en Zaragoza.

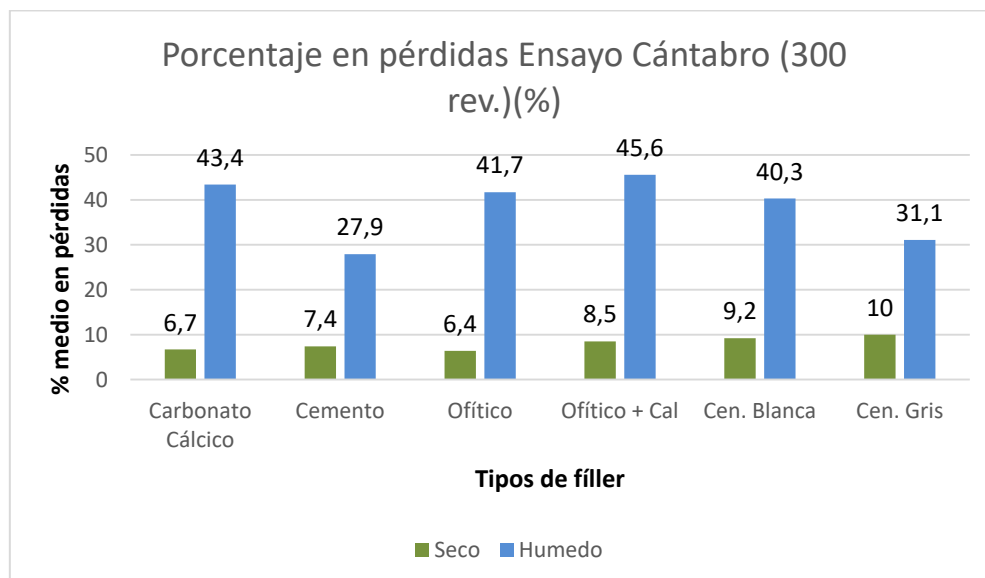


Figura 15 - Porcentaje de pérdidas al Cántabro [17]

Trabajando con una mezcla patrón (método UCL) y una cantidad fija de betún (4.5%) y con una relación C_v/C_s fija de 0.8, se ajustaron las cantidades de fíller requeridas para cada mezcla. A

fin de poder comparar los resultados obtenidos con las mezclas fabricadas con los dos tipos de ceniza estudiadas, fueron también fabricadas otras muestras de control con fílleres comerciales (carbonato cálcico y cemento), así como con filler de recuperación del propio árido (ofítico).

Los resultados, presentados en la figura 15, obtenidos dejaron patente la viabilidad de dichas cenizas para ser utilizadas como fíller. A pesar de que las probetas secas fabricadas con cenizas presentaban pérdidas al cántabro ligeramente mayores que el resto de mezclas, al ensayar las que fueron sometidas a inmersión en agua presentaban unas pérdidas comprendidas entre los valores obtenidos por las probetas fabricadas con los fílleres comerciales.

Resumiendo, el fíller juega un papel crucial en las mezclas bituminosas en caliente. A pesar de todavía no comprender a la perfección como funciona, ha quedado patente en numerosos estudios sus efectos favorables en las mezclas asfálticas, mejorando tanto las características como la durabilidad de las mezclas. Se ha visto también el grave impacto que puede suponer el daño por humedad en las mezclas, reduciendo drásticamente sus propiedades. Finalmente se han puesto de manifiesto la importancia y los beneficios de llevar a cabo las dosificaciones de fíller volumétricamente.

A raíz de todo esto nace el estudio que se explica a continuación, con el fin encontrar la cantidad óptima de ceniza a introducir en una mezcla para obtener el mejor comportamiento frente al daño por humedad y juzgar hasta qué punto resultan estos residuos de la industria papelera óptimos para su utilización como fíller.

4. Plan de trabajo

4.1. Metodología

Se pretende evaluar el efecto del mástico al utilizar diferentes cantidades de ceniza (blanca y gris) en una mezcla bituminosa con el fin de conocer su capacidad para actuar como fíller. Para ello se comparará su respuesta con la de otros másticos en los que se han utilizado otros filleres. Estos filleres serán tanto de aportación, como el propio fíller de recuperación del mismo árido utilizado.

Se fabricarán 6 probetas Marshall para cada cantidad de fíller, utilizando una mezcla patrón sin finos (método Universal de Caracterización de Ligantes o UCL). La ausencia de finos en la mezcla nos permite aislar el efecto del fíller, y así los resultados obtenidos sabemos que no se encontrarán influenciados por los finos. La dosificación del fíller se llevará a cabo volumétricamente a partir de las concentraciones críticas (Cs). Una vez fabricadas las probetas, se procederá a determinar la resistencia a la disgregación y a la acción del agua mediante el ensayo cántabro.

4.2. Materiales

4.2.1. Árido

Se utilizará árido ofídico con la siguiente granulometría:

Tamiz (mm)	5	2.5	0.63
Pasa (%)	100	20	0

Tabla 3 - Granulometría del árido

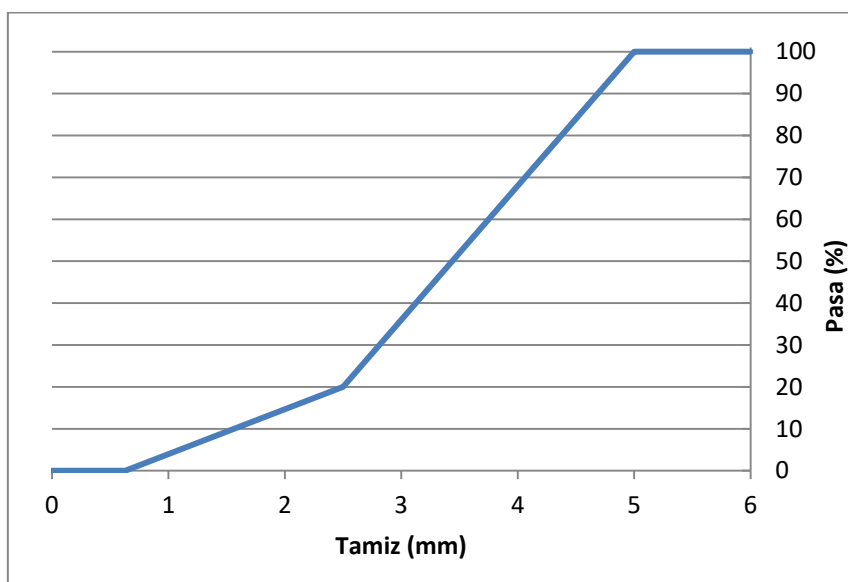


Figura 16 - Curva granulométrica del árido

4.2.2. Betún

El betún a utilizar es 50/70. Se utilizan 40.5 gr de betún por probeta (4.5% sobre 900 gr de árido por probeta, excluyendo el fíller). Esta cantidad se mantiene constante para cada

probeta. Se trata del betún más utilizado en España, considerado como ligante “de uso general” en casi todos los proyectos.

4.2.3. Fíller

Los diferentes fílleres con los que se elaborará el mástico son los siguientes:

- Carbonato cálcico
- Cemento
- Ofítico (de recuperación)
- Ceniza Blanca
- Ceniza Gris

De estos fílleres, el más utilizado es el carbonato cálcico, pues resulta económico y da unas propiedades aceptables en la mayoría de casos. Para mejores resultados se acostumbra a utilizar el cemento, pero este resulta más caro. El ofítico no es más que la porción fina que trae el árido mismo. Este último no se utiliza en si como fíller, pero siempre está presente debido a la gran dificultad y coste de retirarlo completamente de los áridos.

Se estudiarán también los efectos de las siguientes combinaciones de fíller

- Ceniza Blanca + Ofítico (en proporciones de 2/3 + 1/3 en peso)
- Ceniza Blanca + Ofítico (en proporciones de 1/3 + 2/3 en peso)

Estas combinaciones son interesantes pues, como ya se ha mencionado, nunca se consigue retirar el 100% del filler natural que viene con el árido, y estas mezclas nos pueden proporcionar una visión más próxima a la realidad.

A diferencia de cómo hacemos con la ceniza blanca, no se han considerado combinaciones de ceniza gris con fíller ofítico, pues a priori se espera obtener un mejor resultado con el uso de la ceniza blanca que con el uso de la ceniza gris.

La granulometría de los diferentes fílleres se muestra a continuación.

	Carbonato	Cemento	Recuperación	C. Blanca	C. Gris
Tamiz (mm)	Granulometría (% Pasa)				
2	100	98,0	100	100	99,0
0,5	100	92,0	100	98,0	96,0
0,25	100	91,0	99,0	98,0	77,0
0,125	100	90,0	95,0	97,0	22,0
0,063	100	88,3	73,9	94,6	13,3

Tabla 4 - Granulometría de los diferentes fílleres

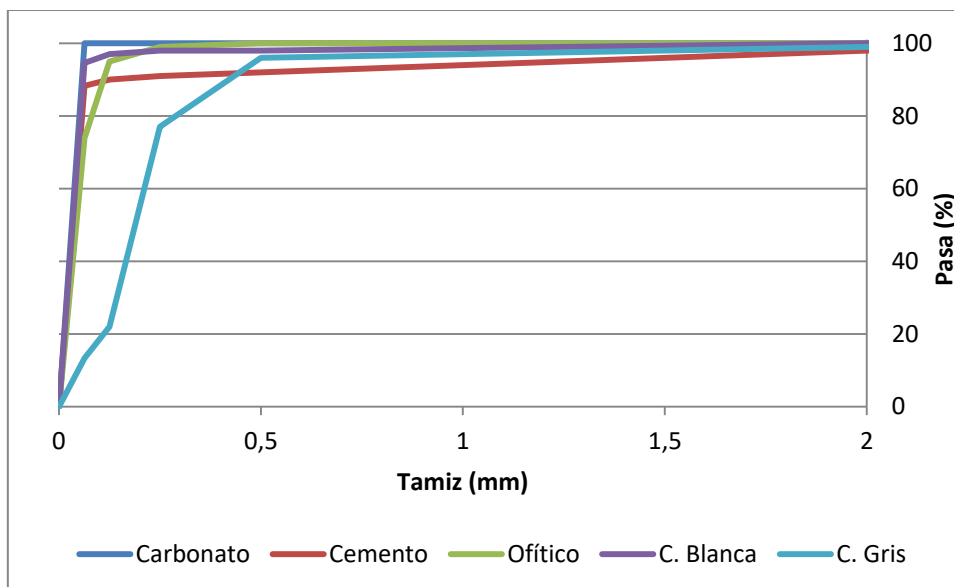


Figura 17 - Curva granulométrica de los diferentes filleres

Tal y como ocurre durante la fabricación de la mezcla en centra, se ha considerado la totalidad del producto suministrado como fíller, independientemente de que no la totalidad del producto pase el tamiz del 0,063 mm. Se debe tener en cuenta, que la presencia de un porcentaje considerable de partículas superiores a los 0,063 mm puede influir en el contenido en huecos de la mezcla. Es decir, a pesar de imponer una misma relación entre la concentración volumétrica y la concentración crítica para cada fíller, el porcentaje de huecos que se obtiene puede ser diferente en cada caso.

4.3. Ensayos

4.3.1. Concentraciones críticas

La dosificación del fíller en mezcla se ha llevado a cabo de forma volumétrica. Se busca para cada tipo de fíller cuál es el volumen que rellena por completo un volumen dado de ligante bituminoso en un ensayo de sedimentación. Esta relación volumétrica se conoce como concentración crítica, y se ha determinado siguiendo la norma IRAM 1542/83, Argentina.

Con el fin de facilitar la sedimentación, la norma permite en lugar del ligante bituminoso, utilizar otro material hidrocarbonatado de menor viscosidad, como el keroseno.

Para el ensayo se requieren tubos de vidrio termo-resistentes de 15 mm de diámetro y aproximadamente 230 mm de longitud, graduados al 0.1 cm³, con graduación hasta 20 cm³; agitadores de alambre delgado de aproximadamente 300 mm de longitud; balanza analítica con precisión de 0.01 gramo; recipiente de unos 2 dm³ capaz de mantener agua a ebullición durante al menos 1 hora para someter los tubos al “Baño María” (figura 18).



Figura 18 - Material necesario para realizar el ensayo de concentraciones críticas

Previo al ensayo se debe tomar una porción de fíller de aproximadamente 100 gramos y secarlo en estufa (entre 105 °C y 110 °C). Posteriormente se pesa con precisión de 0.01 gramos una cantidad de material secado que corresponda a un volumen de sedimentación de 10 cm³ ± 2 cm³.

Primero se colocan aproximadamente 15 cm³ de keroseno en el tubo graduado, y a continuación se introduce la muestra pesada, lenta y cuidadosamente. Con el fin de arrastrar el material que hubiese quedado adherido a las paredes del tubo, se agregan aproximadamente 5 cm³ de keroseno.

Se coloca el tubo en el baño de agua hirviendo de modo que quede sumergida la parte del tubo que contiene el keroseno y el material. Se debe garantizar la posición vertical del tubo. Una vez en el agua, se introduce el agitador de alambre y se tapa la boca del tubo con algodón con el fin de evitar la entrada de vapor de agua. Se mantiene el tubo en el agua hirviendo como mínimo una hora, y se va agitando a intervalos regulares con el agitador de alambre con el fin de eliminar totalmente el aire. Al no desprenderse burbujas, se da por finalizada la operación y se retira el agitador con cuidado de no arrastrar partículas del material.

Se retira el tubo del agua y se deja en reposo, siempre en posición vertical, durante 24 horas ± 15 minutos, evitando que los tubos sufran sacudidas y/o golpes.

Finalmente se lee el volumen (V) ocupado por el material sedimentado. Si dicho volumen no se encuentra entre 8 cm³ y 12 cm³, se debe repetir el ensayo, modificando la masa de material introducido en el tubo de tal manera que el volumen sedimentado final se encuentre entre dichos valores.

La concentración crítica (C_s) se determina mediante la siguiente expresión:

$$C_s = \frac{m}{V \cdot \rho} \quad (4.a)$$

donde

m = masa de fíller vertida en gr

V = volumen de sedimentación en cm³

ρ = densidad del fíller en g/cm³

Fíller	Peso específico (g/cm ³)	Concentración crítica (Cs)
Carbonato cálcico	2,772	0,310
Cemento	2,980	0,251
Ofítico	2,884	0,447
Ceniza Blanca	2,830	0,128
Ceniza Blanca + Ofítico (2/3+1/3)	2,848	0,183
Ceniza Blanca + Ofítico (1/3+2/3)	2,866	0,265
Ceniza Gris	2,244	0,286

Tabla 5 - Peso específico y concentración crítica de cada fíller

Para cada fíller se han utilizado concentraciones volumétricas (C_v) referidas a la concentración crítica (C_v/C_s). Dicha concentración volumétrica se puede calcular de la siguiente manera:

$$C_v = \frac{V_f}{V_f - V_b} \quad (4.b)$$

donde el subíndice f hace referencia al fíller y el subíndice b al betún, y el volumen se calcula como el cociente de la masa sobre la densidad.

Las concentraciones críticas de los fílleres eran conocidas de antemano [16]. Sí que se llevaron a cabo los ensayos para conocer las concentraciones críticas de las distintas mezclas de ceniza blanca con el fíller de recuperación.

Las cantidades de fíller para cada serie de probetas son las siguientes:

Fíller	C_v/C_s	Peso de fíller (g)	Relación ponderal fíller/betún
Carbonato cálcico	0,8	35,3	0,87
	1,0	48,1	1,19
	1,2	63,4	1,57
Cemento	0,8	29,4	0,73
	1,0	39,3	0,97
	1,2	50,5	1,25
Ofítico	0,6	39,7	0,98
	0,8	59,9	1,48
	1,0	86,3	2,13
Ceniza Blanca	0,8	12,7	0,31
	1,0	16,3	0,40
	1,2	20,2	0,50
Ceniza Blanca + Ofítico (2/3+1/3)	0,8	19,2	0,47
	1,2	31,5	0,78
	1,4	37,9	0,93
	1,6	46,4	1,14
Ceniza Blanca + Ofítico (1/3+2/3)	0,8	32,3	0,75
	1,0	40,6	1,00
	1,2	52,6	1,29

Ceniza Gris	0,6	18,3	0,45
	0,8	26,2	0,65
	1,0	35,3	0,87

Tabla 6 - Relación ponderal fíller/betún para cada serie

4.3.2. Fabricación de probetas

Toda la fabricación y la totalidad de los ensayos fueron realizados en el laboratorio de asfaltos de la ETSECCPB.



Figura 19 - Laboratorio de asfaltos de la ETSECCPB

La fabricación de las probetas tipo Marshall se ha realizado de acuerdo con la normativa vigente española:

- Procedimiento de fabricación: *UNE-EN 12697-35. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio* (AENOR, 2006)
- Aparatos de medición: *UNE-EN 12697-38. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 38: Aparatos de ensayo y calibración* (AENOR, 2007)
- Compactación de las probetas: *UNE-EN 12697-30. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de la muestra mediante compactador por impactos* (AENOR, 2006)

Se han fabricado un total de 102 probetas con fíller, así como 6 probetas adicionales sin fíller, lo que nos ha permitido conocer la respuesta del betún ante la ausencia de fíller. Todas las probetas eran cilíndricas, de $101.6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de radio y de altura variable según la cantidad de fíller que estas contuvieran.

Se tamizó el árido con cuidado a fin de separar las dos fracciones granulométricas y descartar el árido con un diámetro superior a 5 mm, así como el de diámetro inferior a 0.63 mm. Previo al tamizado, el material se mantuvo varios días en estufa con el fin de secarlo, pues la baja humedad en este facilita la tarea, permitiendo que los áridos se disgreguen con mayor facilidad.



Figura 20 - Tamizadora



Figura 21 - Árido tamizado

Para cada probeta se han utilizado 900 gramos de árido. Este árido se pesa y coloca en bandejas individuales respetando la granulometría establecida. Antes de empezar la fabricación de las probetas, el árido se debe calentar en estufa a 160 °C durante 4 horas. El betún y los moldes a utilizar deben calentarse a 155 °C, también en estufa.



Figura 22 - Árido calentado en estufa

Una vez todos los materiales se encuentran a la temperatura que les corresponde, se vierte el árido en un cazo, que se encuentra sobre una placa a gas. Se agregan los 40.5 gramos de betún con cuidado a no añadir en exceso. Si esto ocurre, el exceso se retira con la ayuda de un trozo de papel, de modo que el betún sobrante se adhiera a este facilitando su extracción. Con una cuchara se mezclan los materiales hasta que la totalidad de los áridos se encuentran recubiertos por el betún. Finalmente se procede a añadir del fíller a velocidad controlada, puesto que si este paso se lleva a cabo de forma súbita, el polvo tiende a verse arrastrado por el aire desalojado y no se queda en la mezcla. De nuevo se remueve el contenido del cazo hasta que la mezcla se homogeneiza y es imposible discernir las partículas de filler. Se mantiene la mezcla en el cazo hasta que esta alcance los 150 °C.



Figura 23 - Zona de fabricación de probetas Marshall

Una vez la mezcla ha alcanzado los 150 °C, se procede a introducirla en el molde con la ayuda de un embudo. Previo al llenado, se coloca un trozo de papel circular del mismo diámetro del molde en el fondo de este. Esto se debe hacer para evitar que la mezcla se pegue al molde y la probeta se rompa al girarla. Una vez introducida la mezcla en el molde, se procede a una primera reacomodación manual con espátula: 20 golpes en el perímetro y 5 en el centro. Una vez compactado se añade otro trozo de papel igual al anterior (y con el mismo fin) en la cara superior, y se procede a la compactación por impacto. En cada probeta se realizaron 50 golpes por cara.



Figura 24 - Compactadora de probetas Marshall

Una vez compactadas, se dejan enfriar a la temperatura ambiente del laboratorio, que es aproximadamente de 20 °C. Durante este proceso de enfriado, se dejan las probetas en posición lateral (las caras planas perpendiculares al suelo) para evitar que la mezcla, todavía caliente, asiente y la probeta se deforme. Una vez las probetas se han enfriado, se procede a su desmoldado con la ayuda de un gato hidráulico.



Figura 25 - Gato hidráulico de 5T



Figura 26 - Probetas desmoldadas

4.3.3. Densidad aparente y porcentaje de huecos

Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente de las probetas se han seguido las especificaciones de la norma UNE-EN 12697-6. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático* (AENOR, 2006)

Se define la densidad aparente en seco como la relación de la masa en seco de la probeta por unidad de volumen, incluyendo los huecos. En cada probeta se han tomado tres medidas de su altura con un pie de rey digital, de precisión 0.1 mm. Las mediciones se han tomado cada 120°. El diámetro es conocido y es el del molde, 101.6 mm. El último dato necesario es la masa de la probeta, que se ha obtenido con una balanza de precisión de 0.1g.

La fórmula para obtener la densidad (D) aparente es la siguiente:

$$D = \frac{m}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h_m} \cdot 1000 \quad (4.c)$$

donde

m corresponde a la masa de la probeta (en gramos)

d corresponde al diámetro de la probeta (101.6 mm para todas las probetas)

h_m corresponde a la altura media, obtenida como el promedio de las tres mediciones de altura (en mm)

El resultado se obtiene en g/cm³.

Porcentaje de huecos

Para determinar el porcentaje de huecos de las probetas se han seguido las especificaciones de la norma *NTL-168/90. Densidad de huecos en mezclas compactadas* (CEDEX)

El porcentaje de huecos en mezcla (H) se ha calculado con la siguiente fórmula:

$$H = 100 - D \cdot \left(\frac{\%_a}{\rho_a} + \frac{\%_b}{\rho_b} + \frac{\%_f}{\rho_f} \right) \quad (4.d)$$

donde

D corresponde a la densidad en g/cm³

%_a corresponde al porcentaje de áridos en la mezcla

ρ_a corresponde a la densidad de los áridos (2.959 g/cm³)

%_b corresponde al porcentaje de betún en la mezcla

ρ_b corresponde a la densidad del betún (1.030 g/cm³)

%_f corresponde al porcentaje de fíller en la mezcla

ρ_f corresponde a la densidad del fíller en g/cm³

4.3.4. Ensayo cántabro

Origen del ensayo

En el año 1979, en el Laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Santander se desarrolló el ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste. El objetivo de dicho ensayo es el de caracterizar mezclas bituminosas de granulometría abierta para capas de rodadura.

El ensayo pretende estudiar el principal fallo de estas mezclas, evaluando su cohesión y su resistencia a disgregación. Los ensayos existentes hasta la fecha para mezclas convencionales se limitaban únicamente a medir la estabilidad, y no tenían en cuenta los fenómenos ya mencionados.

Con el fin de conseguir más información referente a la cohesión de las mezclas, se planteó la idea de fabricar probetas con el compactador Marshall, y someterlas a un ensayo similar al ensayo Los Angeles. Con este nuevo ensayo se pretendía determinar las pérdidas por desgaste debidas a los efectos abrasivos y de succión que causan el tráfico en las mezclas bituminosas porosas.

Efecto del agua

Con el fin de conocer el efecto del agua sobre las distintas muestras, de cada serie de tres probetas, se seleccionaran tres y se someterán a una inmersión en agua a 60 °C durante 24 horas ± 15 minutos. Estas probetas se seleccionarán en función de su densidad aparente, de tal manera que el promedio de dicha densidad correspondiente a las tres probetas que sufren inmersión y el de las que no la sufren, sea lo más parecido posible.



Figura 27 - Baño para la inmersión de probetas

Una vez pasado el periodo de inmersión, las probetas se dejarán escurrir y secar durante otras 24 horas \pm 15 minutos. Como pasado este periodo de secado las probetas deben ser ensayadas, es conveniente dejarlas en la sala donde van a ser ensayadas con el fin de que ya se encuentren a temperatura de ensayo.

Descripción del ensayo

El ensayo se realiza a temperatura controlada. Esta temperatura generalmente es de entre 15 °C y 30 °C. Los ensayos descritos en el presente documento se realizaron a 25 °C, que se mantiene constante gracias al regulador de temperatura que se encuentra instalado donde se realizan los ensayos. Como el ensayo genera mucho ruido, la sala también consta de un aislamiento acústico.

La máquina que se utiliza para este ensayo es la misma que se emplea para el ensayo de desgaste de áridos por medio de la máquina de Los Angeles (NTL-149/72). En este caso el ensayo se realiza sin la carga abrasiva de bolas de acero. Las características de la máquina de Los Angeles están definidas en el apartado 2.1 de la Norma NTL-149.



Figura 28 - Máquina de Los Ángeles

Primero se pesa la probeta con una balanza de precisión de 0.1 gramos, y a continuación se introducen en la máquina. Se asegura la tapa del tambor con 4 tornillos y se hace girar 300 revoluciones a una velocidad comprendida entre 3.1 rad/s y 3.5 rad/s. Esto suele durar alrededor de los 10 minutos.

Una vez completadas las 300 revoluciones, se retira la probeta, la cual ha perdido material debido al desgaste, y se vuelve a pesar con la misma balanza. En caso de que se encuentre la probeta partida en dos o más trozos de gran tamaño, se tomará el de mayor masa. Destacar que este caso se da en escasas ocasiones, y en este estudio no ha ocurrido.

Es importante que después de cada ensayo, y una vez extraída la probeta desgastada, se vacíe el tambor para que los restos de árido que se han disgregado de la muestra inicial, no interfieran en los resultados de la siguiente.

El proceso se realiza de forma idéntica tanto para las probetas ensayadas en seco como para las húmedas. Para obtener el porcentaje de pérdidas (P), se utilizará la misma fórmula tanto para las probetas secas como las húmedas.

$$P = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (4.e)$$

donde

m_i es la masa de la probeta antes del ensayo en gramos

m_f es la masa de la probeta después del ensayo en gramos

Una vez obtenidos los resultados de una misma serie, se calcula el promedio de las pérdidas en seco y el de las pérdidas en húmedo, obteniendo el valor de la pérdida por desgaste como tanto por ciento de la masa inicial.

5. Resultados

En el presente apartado se recogen los resultados obtenidos de los ensayos descritos anteriormente, así como algunos comentarios respecto de los mismos.

5.1. Densidad aparente y porcentaje de huecos

5.1.1. Sin fíller

Las probetas que han sido fabricadas sin fíller presentan una densidad de 2,059 g/cm³. Debido a la ausencia de fíller, esta densidad es una de las más bajas de todas las probetas. Las probetas fabricadas con ceniza blanca, con una concentración C_v/C_s de 0,8, presentan una densidad ligeramente menor. Esto se debe a la dispersión propia del ensayo.

Por lo que respecta al porcentaje de huecos, para estas probetas es de 24,80%.

6.1.2. Carbonato Cálcico

En la siguiente tabla y figura se muestran las densidades y los porcentajes de huecos de las diferentes probetas fabricadas con carbonato cálcico, ordenadas según su concentración de fíller. La cantidad de fíller que corresponde a cada concentración es la siguiente:

- $C_v/C_s = 0,8$ → 36,0 g
- $C_v/C_s = 1,0$ → 48,1 g
- $C_v/C_s = 1,2$ → 63,4 g

Se muestra también en qué porcentaje aumenta o disminuye cada valor para una concentración respecto de la anterior.

C_v/C_s	0,8	→	1,0	→	1,2
Densidad (g/cm ³)	2,082	+3,69%	2,159	+0,80%	2,176
Huecos (%)	23,94	-10,83%	21,34	-3,69%	20,55

Tabla 7 - Densidades y porcentaje de huecos - Carbonato Cálcico

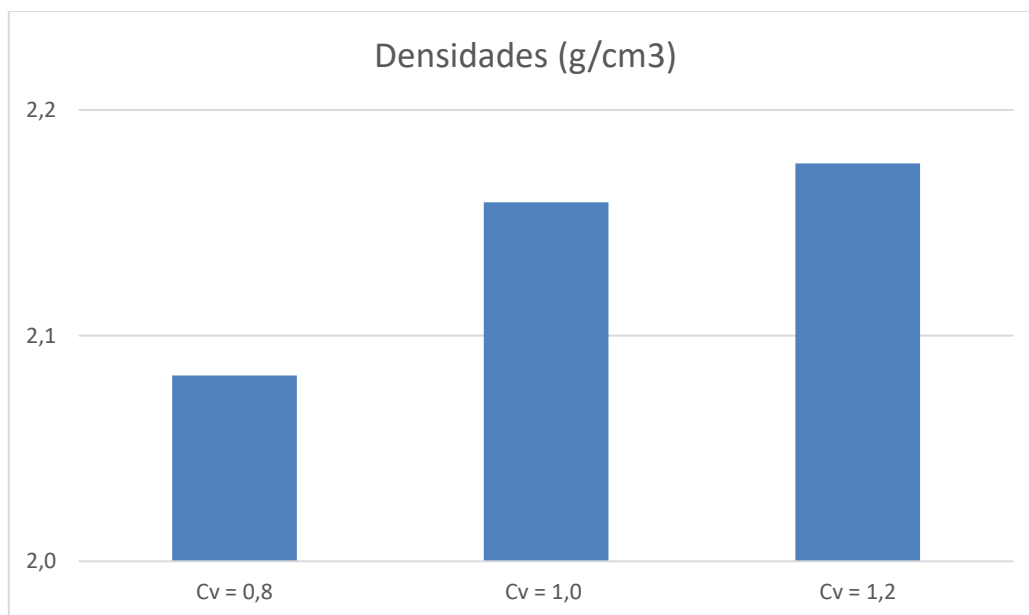


Figura 29 - Densidades según relación volumétrica - Carbonato Cálcico

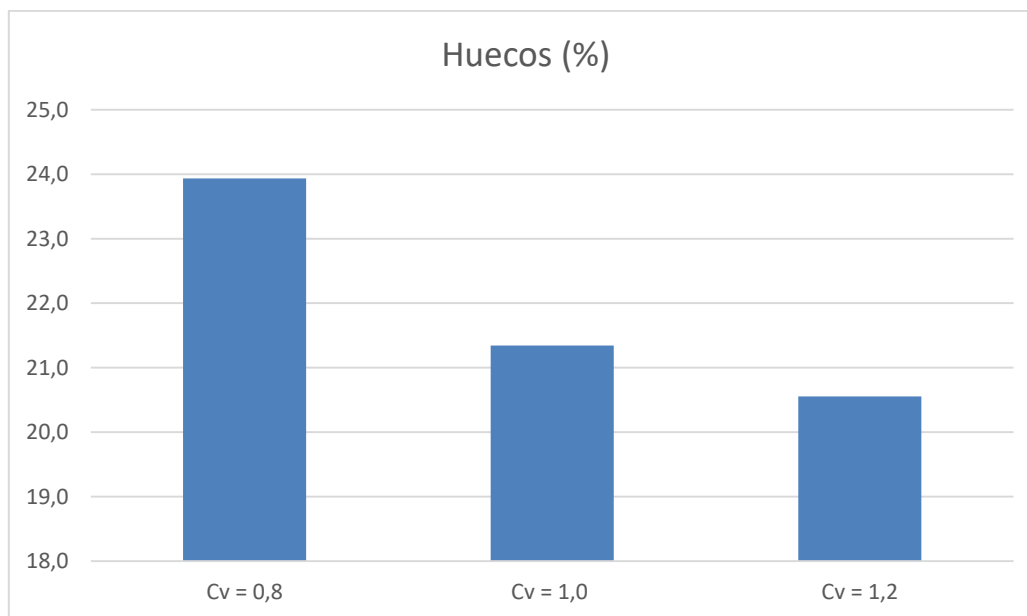


Figura 30 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Carbonato Cálcico

5.1.3. Cemento

En la siguiente tabla y figura se muestran las densidades y los porcentajes de huecos de las diferentes probetas fabricadas con cemento, ordenadas según su concentración de fíller. La cantidad de fíller que corresponde a cada concentración es la siguiente:

- $C_v/C_s = 0,8$ → 29,5 g
- $C_v/C_s = 1,0$ → 39,3 g
- $C_v/C_s = 1,2$ → 50,5 g

Se muestra también en qué porcentaje aumenta o disminuye cada valor para una concentración respecto de la anterior.

C_v/C_s	0,8	→	1,0	→	1,2
Densidad (g/cm^3)	2,066	+2,87%	2,125	+1,08%	2,148
Huecos (%)	24,53	-7,99%	22,57	-4,40%	21,57

Tabla 8 - Densidades y porcentaje de huecos – Cemento

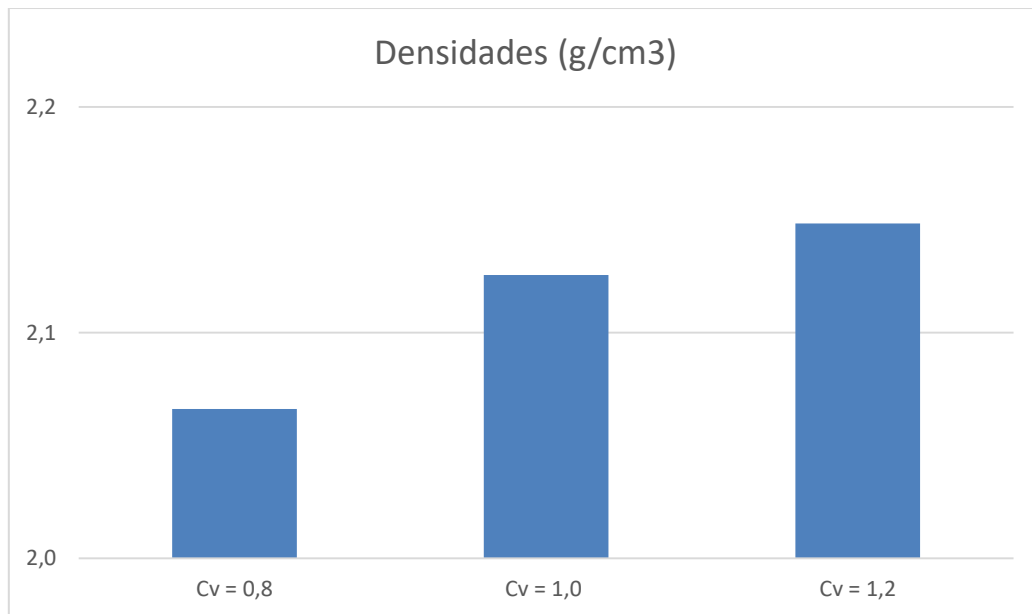


Figura 31 - Densidades según relación volumétrica - Cemento

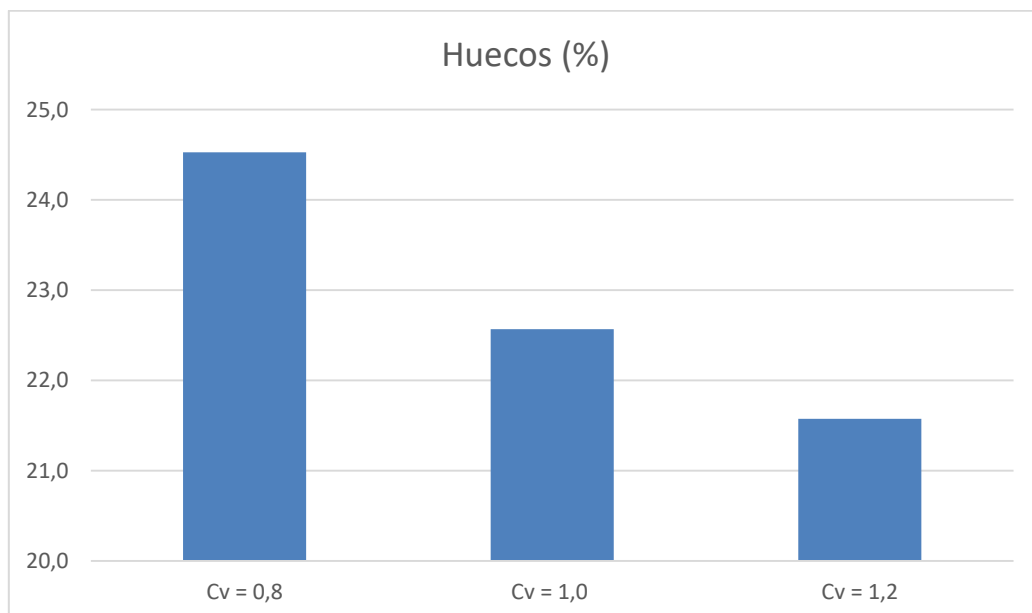


Figura 32 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Cemento

5.1.4. Ofítico

En la siguiente tabla y figura se muestran las densidades y los porcentajes de huecos de las diferentes probetas fabricadas con fíller de recuperación, ordenadas según su concentración de fíller. La cantidad de fíller que corresponde a cada concentración es la siguiente:

- $C_v/C_s = 0,6$ → 39,7 g
- $C_v/C_s = 0,8$ → 59,9 g
- $C_v/C_s = 1,0$ → 86,3 g

Se muestra también en qué porcentaje aumenta o disminuye cada valor para una concentración respecto de la anterior.

C_v/C_s	0,8	→	1,0	→	1,2
Densidad (g/cm ³)	2,136	+0,94%	2,156	+2,77%	2,215
Huecos (%)	21,99	-2,36%	21,47	-10,92%	19,13

Tabla 9 - Densidades y porcentaje de huecos – Ofítico

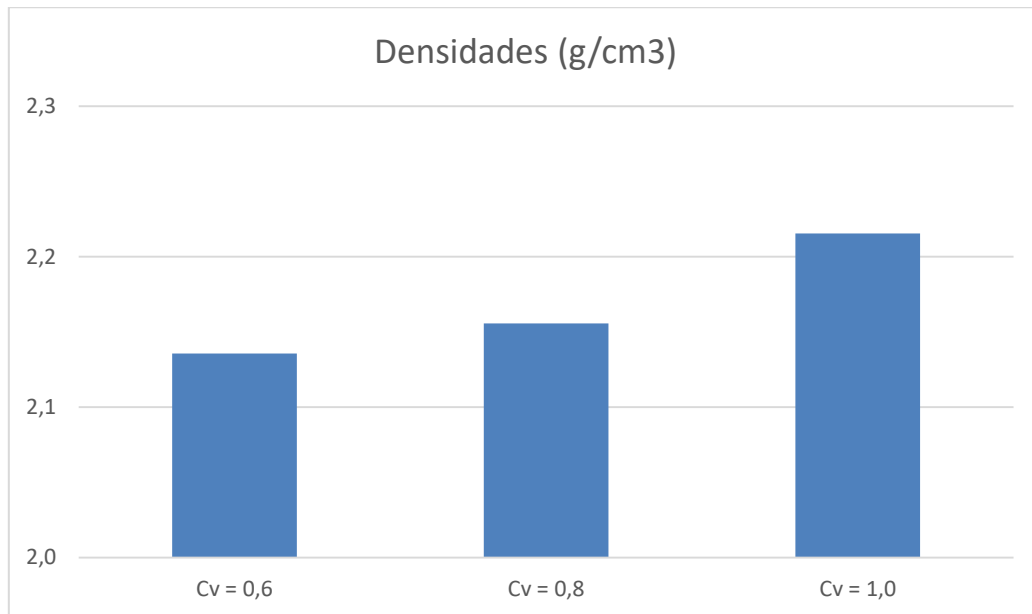


Figura 33 - Densidades según relación volumétrica – Ofítico

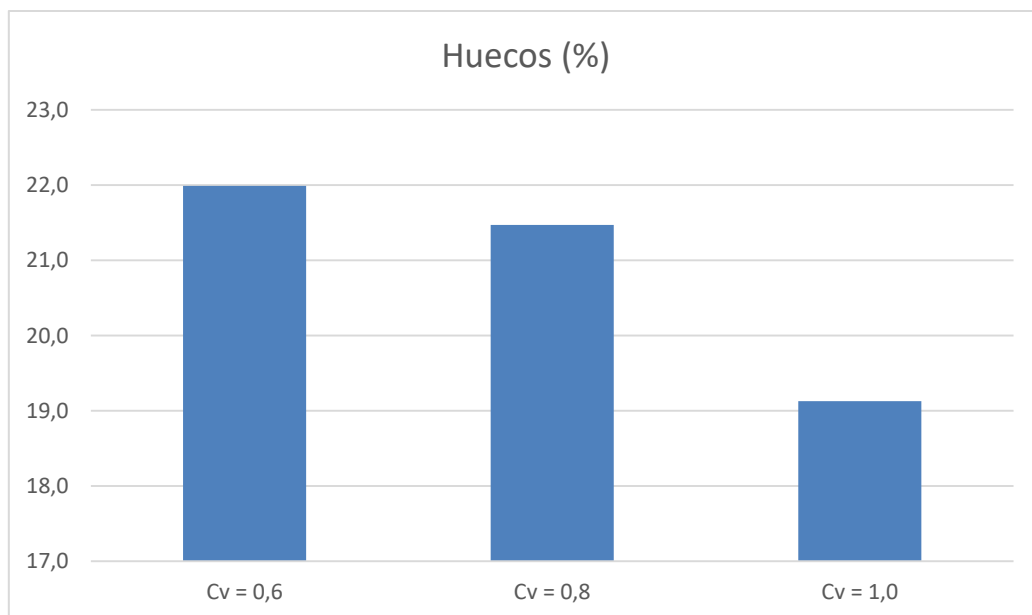


Figura 34 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ofítico

5.1.5. Ceniza Blanca

En la siguiente tabla y figura se muestran las densidades y los porcentajes de huecos de las diferentes probetas fabricadas con ceniza blanca, ordenadas según su concentración de fíller. La cantidad de fíller que corresponde a cada concentración es la siguiente:

- $C_v/C_s = 0,8$ → 12,6 g
- $C_v/C_s = 1,0$ → 16,3 g
- $C_v/C_s = 1,2$ → 20,2 g

Se muestra también en qué porcentaje aumenta o disminuye cada valor para una concentración respecto de la anterior.

C_v/C_s	0,8	→	1,0	→	1,2
Densidad (g/cm ³)	2,028	+4,87%	2,127	+0,48%	2,137
Huecos (%)	25,92	-13,10%	22,53	-2,35%	22,00

Tabla 10 - Densidades y porcentaje de huecos - Ceniza Blanca

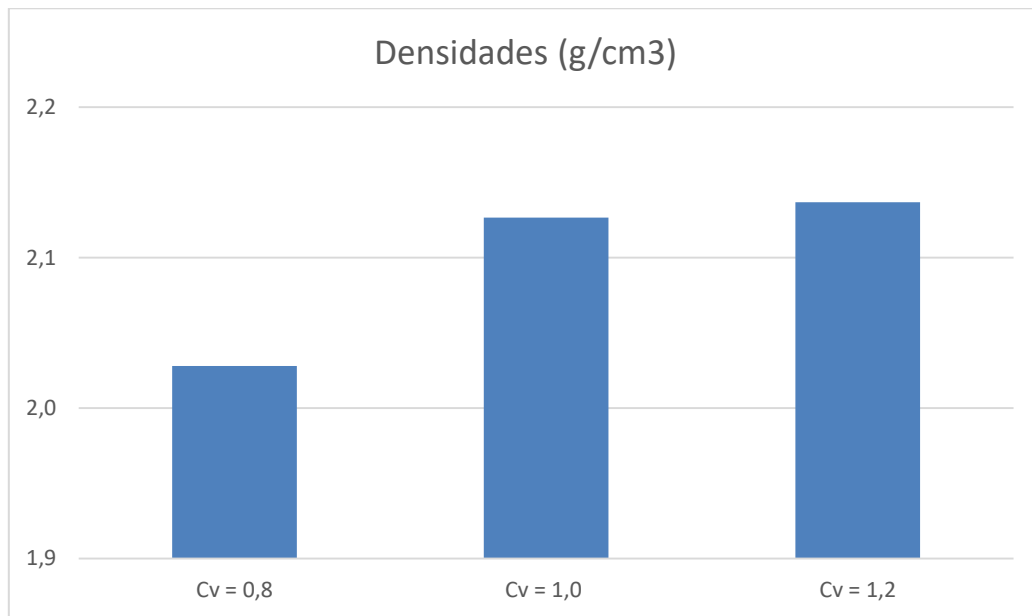


Figura 35 - Densidades según relación volumétrica - Ceniza Blanca

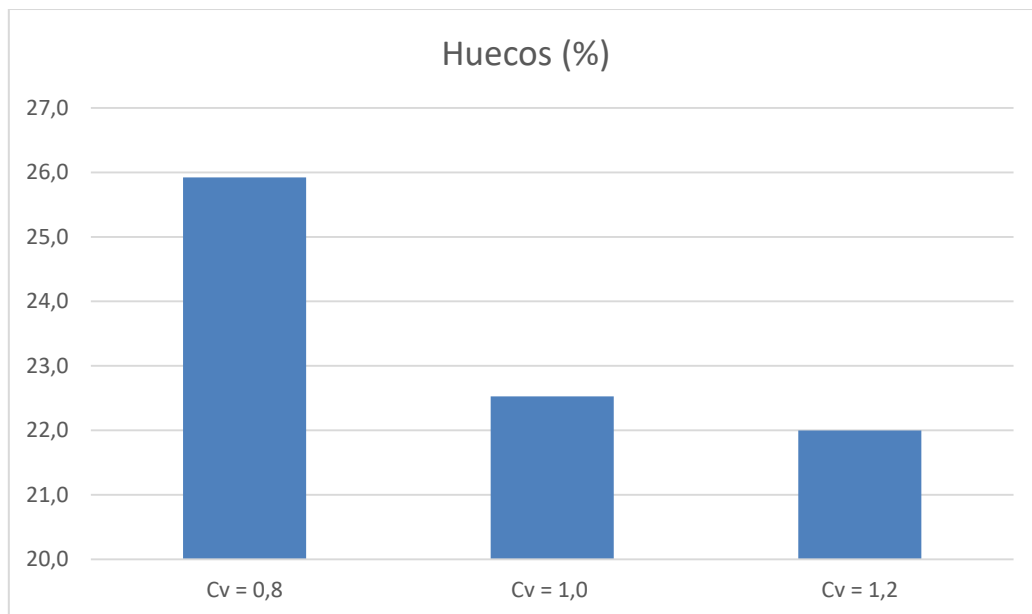


Figura 36 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ceniza Blanca

5.1.6. Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)

En la siguiente tabla y figura se muestran las densidades y los porcentajes de huecos de las diferentes probetas fabricadas con la combinación de ceniza blanca y fíller de recuperación (a razón de 1/3 – 2/3), ordenadas según su concentración de fíller. La cantidad de fíller que corresponde a cada concentración es la siguiente:

- $C_v/C_s = 0,8$ → 30,3 g
- $C_v/C_s = 1,0$ → 40,6 g
- $C_v/C_s = 1,2$ → 52,6 g

Se muestra también en qué porcentaje aumenta o disminuye cada valor para una concentración respecto de la anterior.

C_v/C_s	0,8	→	1,0	→	1,2
Densidad (g/cm^3)	2,099	+0,94%	2,119	+0,68%	2,134
Huecos (%)	23,31	-2,20%	22,80	-3,01%	22,11

Tabla 11 - Densidades y porcentaje de huecos - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)

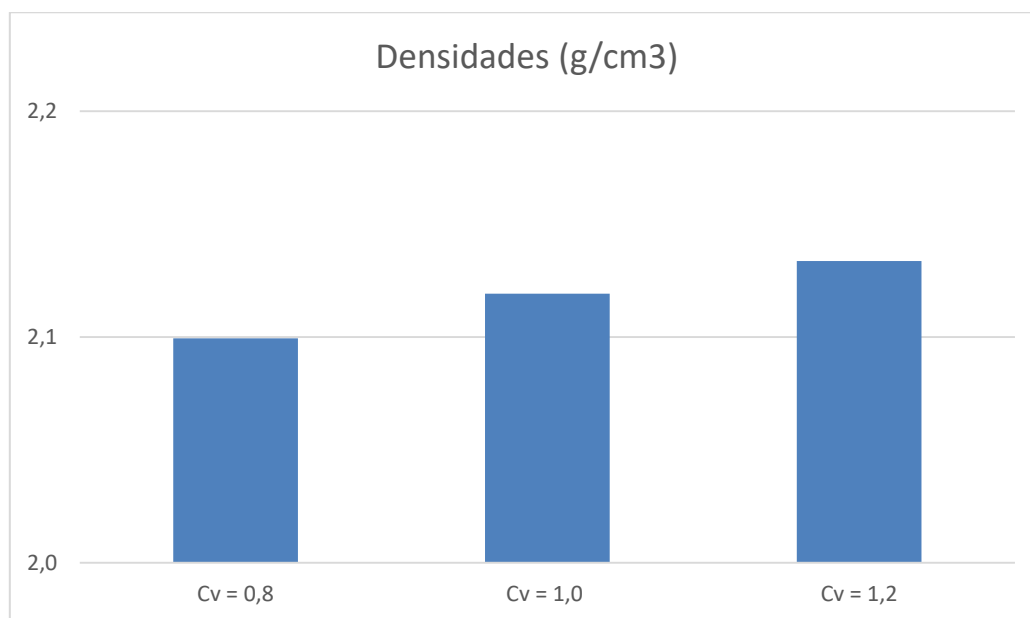


Figura 37 - Densidades según relación volumétrica - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)

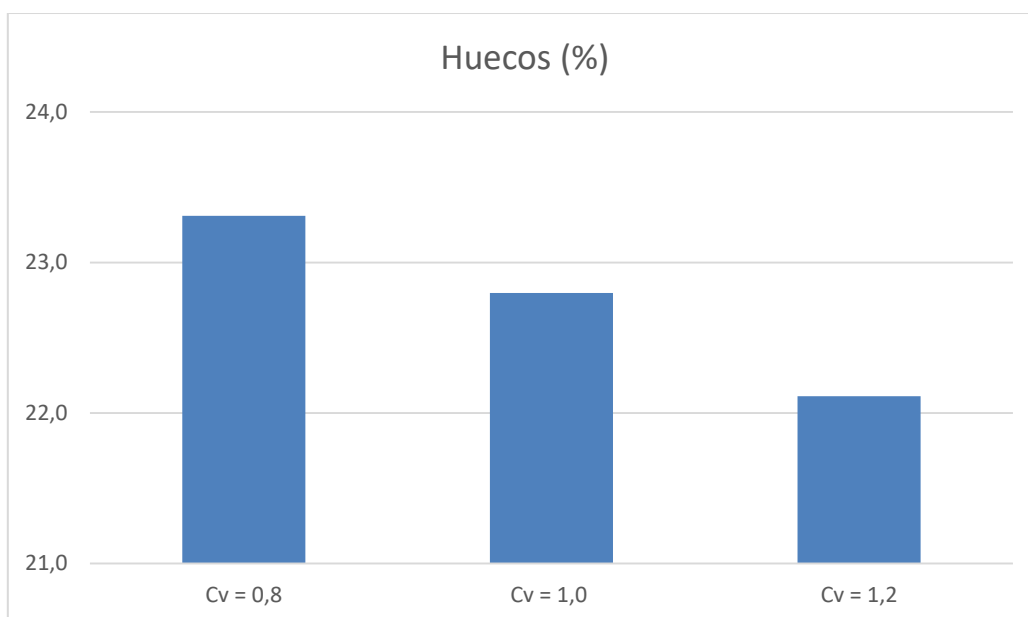


Figura 38 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)

5.1.7. Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)

En la siguiente tabla y figura se muestran las densidades y los porcentajes de huecos de las diferentes probetas fabricadas con la combinación de ceniza blanca y fíller de recuperación (a razón de 2/3 – 1/3), ordenadas según su concentración de fíller. La cantidad de fíller que corresponde a cada concentración es la siguiente:

- $C_v/C_s = 0,8$ → 19,2 g
- $C_v/C_s = 1,2$ → 31,5 g
- $C_v/C_s = 1,4$ → 37,9 g
- $C_v/C_s = 1,6$ → 46,4 g

Se muestra también en qué porcentaje aumenta o disminuye cada valor para una concentración respecto de la anterior.

C_v/C_s	0,8	→	1,2	→	1,4	→	1,6
Densidad (g/cm ³)	2,091	+1,30%	2,118	+0,53%	2,129	+0,45%	2,139
Huecos (%)	23,63	-3,31%	22,85	-2,49%	22,28	-3,92%	21,41

Tabla 12 - Densidades y porcentaje de huecos - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)

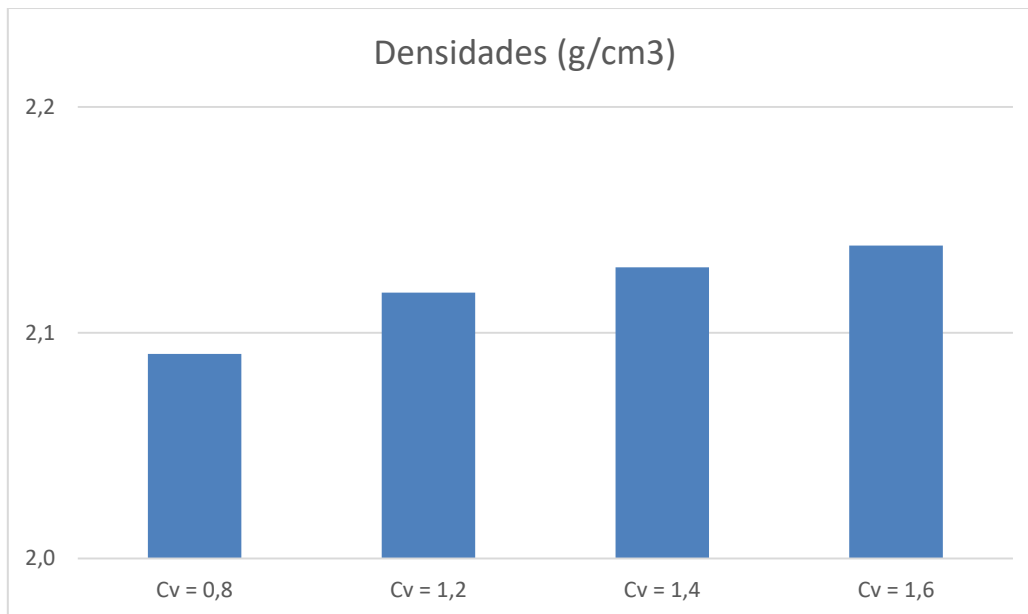


Figura 39 - Densidades según relación volumétrica - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)

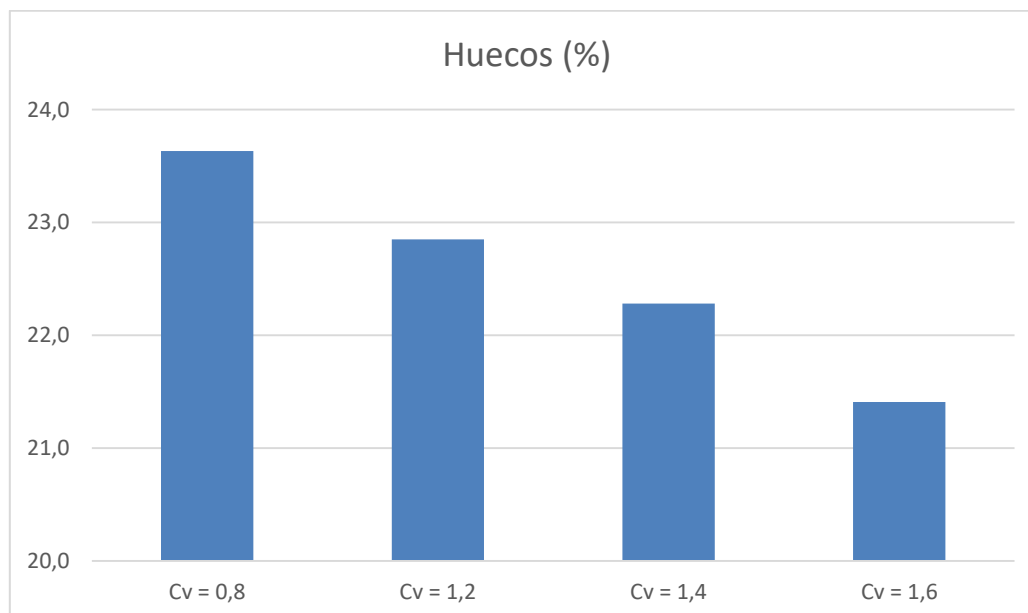


Figura 40 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)

5.1.8. Ceniza Gris

En la siguiente tabla y figura se muestran las densidades y los porcentajes de huecos de las diferentes probetas fabricadas con ceniza gris, ordenadas según su concentración de fíller. La cantidad de fíller que corresponde a cada concentración es la siguiente:

- $C_v/C_s = 0,6$ → 18,3 g
- $C_v/C_s = 0,8$ → 26,2 g
- $C_v/C_s = 1,0$ → 35,3 g

Se muestra también en qué porcentaje aumenta o disminuye cada valor para una concentración respecto de la anterior.

C_v/C_s	0,8	→	1,0	→	1,2
Densidad (g/cm^3)	2,082	-0,36%	2,075	+1,80%	2,112
Huecos (%)	23,94	+2,00%	24,42	-6,21%	22,90

Tabla 13 - Densidades y porcentaje de huecos - Ceniza Gris

Observamos que para la ceniza gris, la densidad y el porcentaje de huecos varía diferente a como se esperaría entre la relación C_v/C_s de 0,8 y la de 1,0. Esto es posible que se deba a la dispersión propia del ensayo.

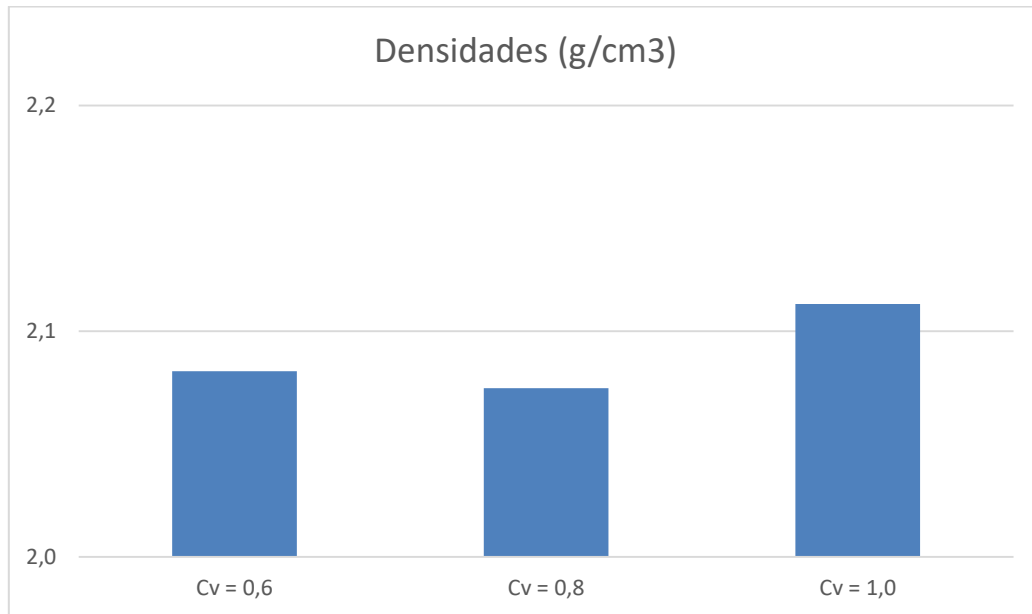


Figura 41 - Densidades según relación volumétrica - Ceniza Gris

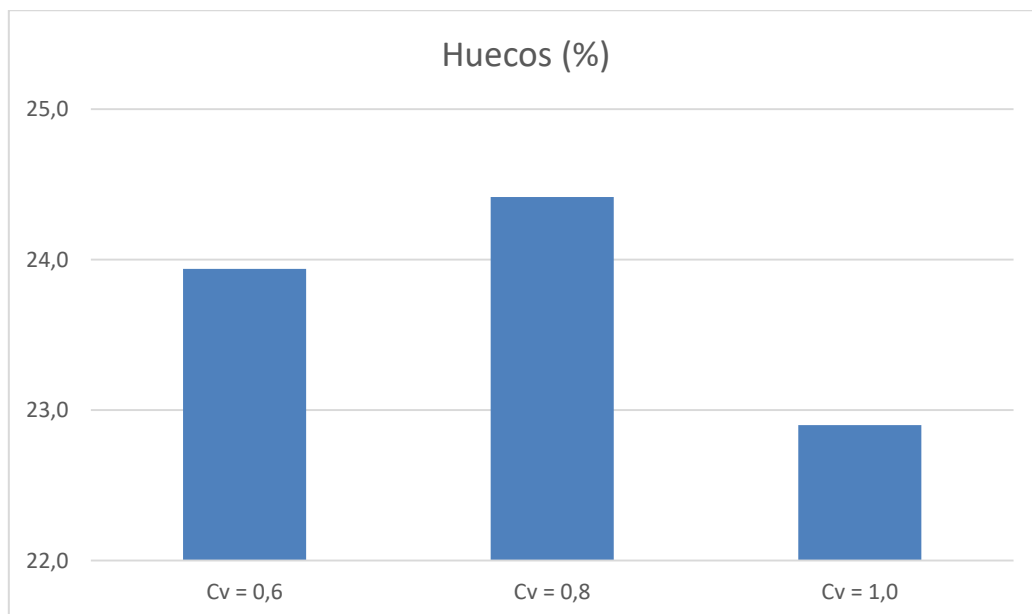


Figura 42 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ceniza Gris

5.1.9. Resumen

A continuación se muestran todos los resultados en una misma tabla.

Fíller	Cv/Cs	Densidad (g/cm³)	Huecos (%)
<i>Sin fíller</i>	-	2,059	24,80
<i>Carbonato Cálcico</i>	0,8	2,082	23,94
	1,0	2,159	21,13
	1,2	2,176	20,49
<i>Cemento</i>	0,8	2,066	24,73
	1,0	2,125	22,63
	1,2	2,148	21,86
<i>Ofítico</i>	0,6	2,136	22,17
	0,8	2,156	21,52
	1,0	2,215	19,44
<i>Ceniza Blanca</i>	0,8	2,028	25,92
	1,0	2,127	22,38
	1,2	2,137	20,02
<i>Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)</i>	0,8	2,099	23,24
	1,0	2,119	22,49
	1,2	2,134	21,92
<i>Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)</i>	0,8	2,091	23,71
	1,2	2,118	22,75
	1,4	2,129	22,36
	1,6	2,139	22,04
<i>Ceniza Gris</i>	0,6	2,082	23,62
	0,8	2,075	23,75
	1,0	2,112	21,91

Tabla 14 - - Densidades y porcentaje de huecos para todas las mezclas

5.2. Ensayo cántabro

Se verá a continuación que los resultados obtenidos ponen de manifiesto que, en general, el porcentaje de pérdidas tras el ensayo cántabro de las probetas en seco son muy similares. Estos resultados se encuentran, en la mayoría de los casos, comprendidos alrededor del $7\% \pm 1\%$. En cambio, los resultados de las probetas húmedas, presentan una mayor variedad. Es por ello que se ha decidido considerar el incremento de pérdidas entre las probetas tras inmersión y las probetas en seco como parámetro representativo que nos permita valorar el efecto que causa la acción del agua en la mezcla.

La teoría nos dice, que para cada tipo de fíller, el incremento de pérdidas debería tender a ser mínimo para una relación C_v/C_s comprendida entre 0,8 y 1,0, según el tipo de fíller del que se trate. Cuando la relación C_v/C_s supera el 1,0 se produce una sobrefillerización, que debería traducirse en un incremento de pérdidas, el cual aumenta a medida que lo hace la concentración de fíller. Del mismo modo, para relaciones C_v/C_s bajos, inferiores a 0,8, también debería producirse un incremento en pérdidas, ya que la fillerización no es suficiente y encontramos cada vez menos fíller a medida que la relación disminuye, tendiendo al valor de referencia que se obtiene a partir de la mezcla sin fíller.

A continuación se muestran los resultados para cada tipo de mezcla.

5.2.1. Sin fíller

Para la mezcla de referencia fabricada sin fíller, se obtienen unas pérdidas en las probetas en seco de 10,7%, mientras que en las probetas sometidas a inmersión dichas pérdidas son de 86,2%. Así pues, el incremento de pérdidas en este caso es de 75,5%.

5.2.2. Carbonato Cálcico

En la siguiente tabla se muestran las pérdidas en seco y tras inmersión para cada relación C_v/C_s estudiada, así como el incremento en pérdidas para las probetas fabricadas con carbonato cálcico.

C_v/C_s	0,8	1,0	1,2
En seco (%)	6,7	4,9	7,3
Tras inmersión (%)	43,4	43,8	52,0
Incremento (%)	36,7	38,8	44,7

Tabla 15 - Pérdidas al Cántabro - Carbonato Cálcico

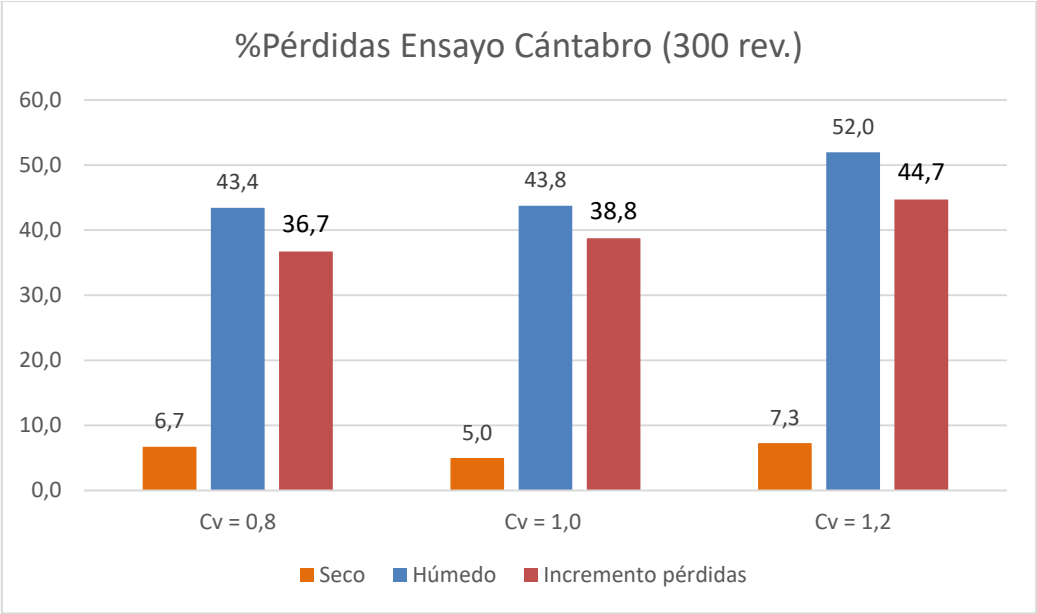


Figura 43 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Carbonato Cálcico

5.2.3. Cemento

En la siguiente tabla se muestran las pérdidas en seco y tras inmersión para cada relación Cv/Cs estudiada, así como el incremento en pérdidas para las probetas fabricadas con cemento.

C _v /C _s	0,8	1,0	1,2
En seco (%)	7,7	7,0	4,6
Tras inmersión (%)	27,9	27,7	25,6
Incremento (%)	20,5	20,7	21,0

Tabla 16 - Pérdidas al Cántabro – Cemento

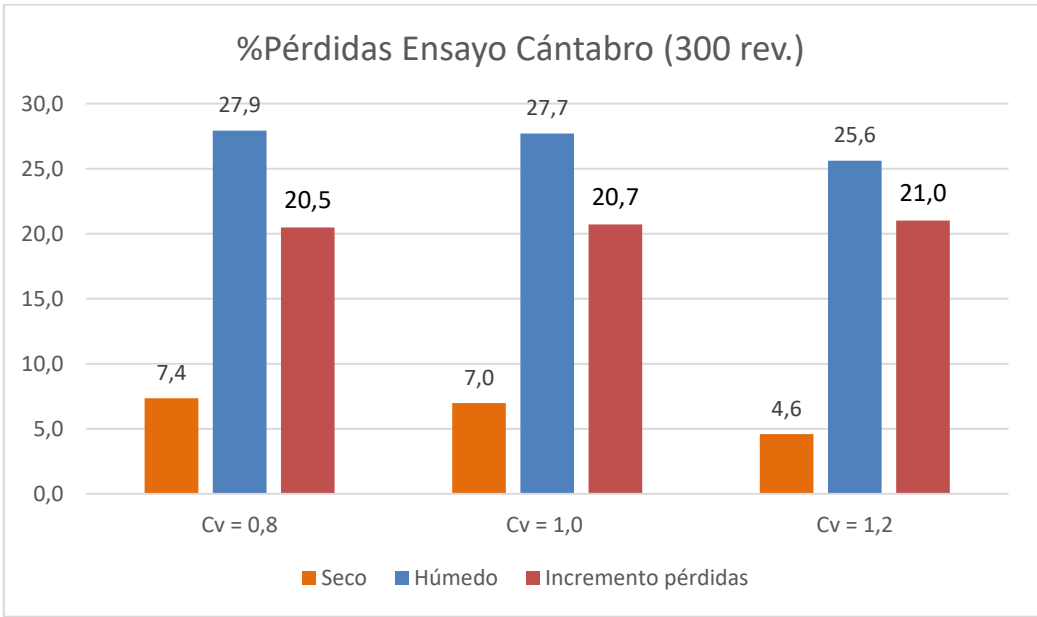


Figura 44 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Cemento

5.2.4. Ofítico

En la siguiente tabla se muestran las pérdidas en seco y tras inmersión para cada relación C_v/C_s estudiada, así como el incremento en pérdidas para las probetas fabricadas con fíller de recuperación.

C_v/C_s	0,6	0,8	1,0
En seco (%)	7,2	6,4	6,5
Tras inmersión (%)	52,2	41,7	44,2
Incremento (%)	45,0	41,7	44,2

Tabla 17 - Pérdidas al Cántabro - Ofítico

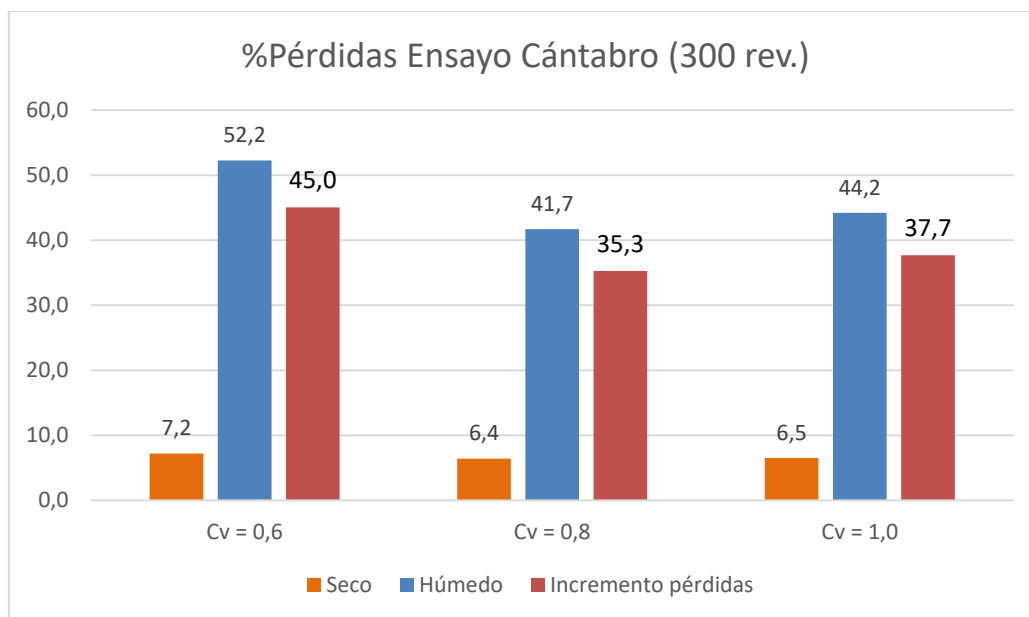


Figura 45 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ofítico

5.2.5. Ceniza Blanca

En la siguiente tabla se muestran las pérdidas en seco y tras inmersión para cada relación C_v/C_s estudiada, así como el incremento en pérdidas para las probetas fabricadas con ceniza blanca.

C_v/C_s	0,8	1,0	1,2
En seco (%)	9,2	8,4	7,9
Tras inmersión (%)	40,3	39,4	39,8
Incremento (%)	31,1	31,0	31,9

Tabla 18 - Pérdidas al Cántabro - Ceniza Blanca

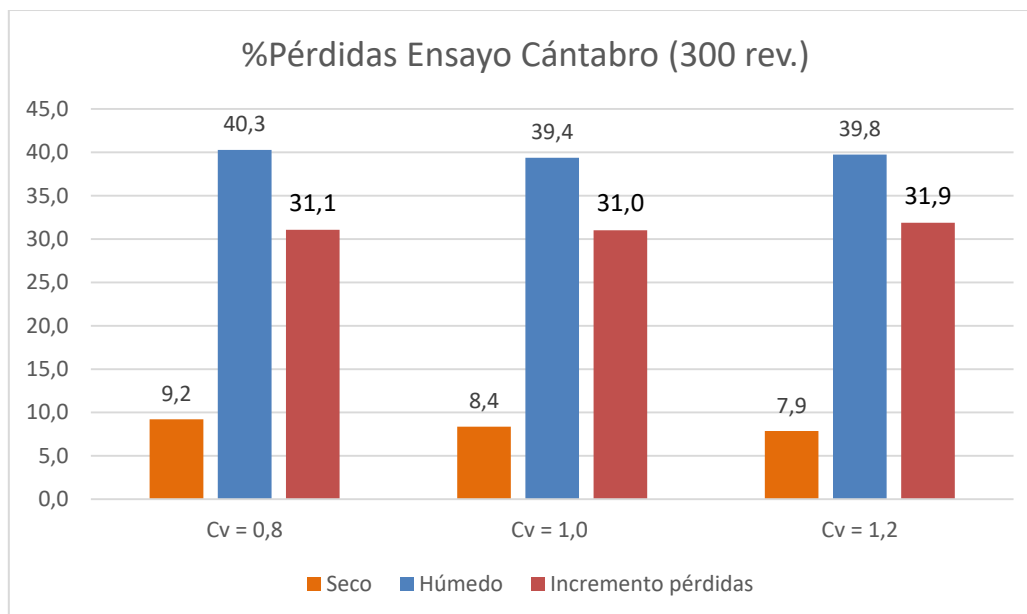


Figura 46 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ceniza Blanca

5.2.6. Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)

En la siguiente tabla se muestran las pérdidas en seco y tras inmersión para cada relación C_v/C_s estudiada, así como el incremento en pérdidas para las probetas fabricadas con la combinación de ceniza blanca y fíller de recuperación (a razón de 1/3 – 2/3).

C_v/C_s	0,8	1,0	1,2
En seco (%)	8,0	7,8	8,2
Tras inmersión (%)	42,3	39,8	40,5
Incremento (%)	34,3	32,0	32,3

Tabla 19 - Pérdidas al Cántabro - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)

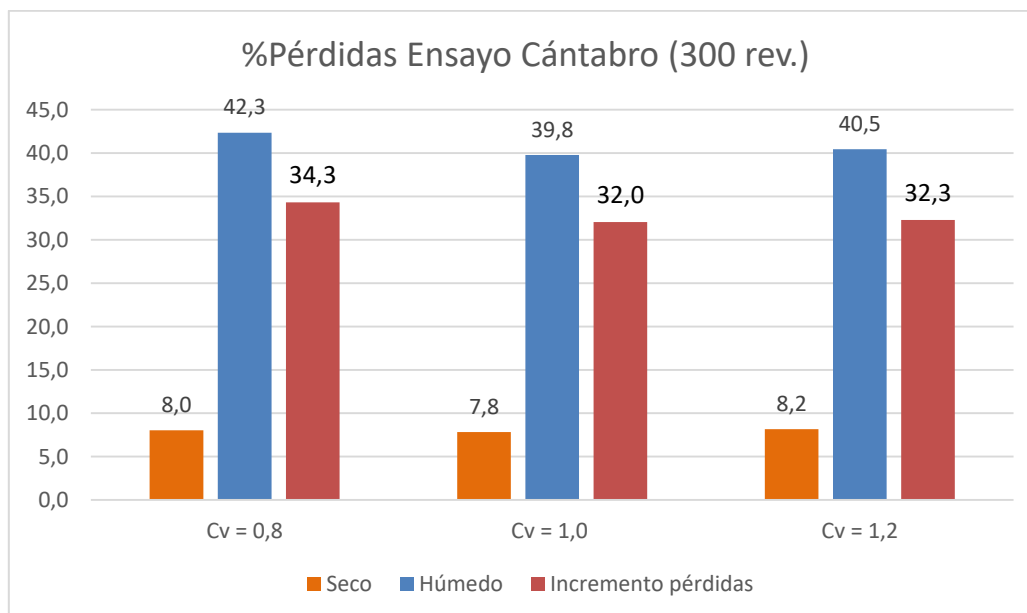


Figura 47 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)

5.2.7. Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)

En la siguiente tabla se muestran las pérdidas en seco y tras inmersión para cada relación Cv/Cs estudiada, así como el incremento en pérdidas para las probetas fabricadas con la combinación de ceniza blanca y fíller de recuperación (a razón de 2/3 – 1/3).

C_v/C_s	0,8	1,2	1,4	1,6
En seco (%)	6,8	6,3	7,5	7,2
Tras inmersión (%)	43,0	34,5	33,6	34,9
Incremento (%)	34,4	28,2	26,1	27,7

Tabla 20 - Pérdidas al Cántabro - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)

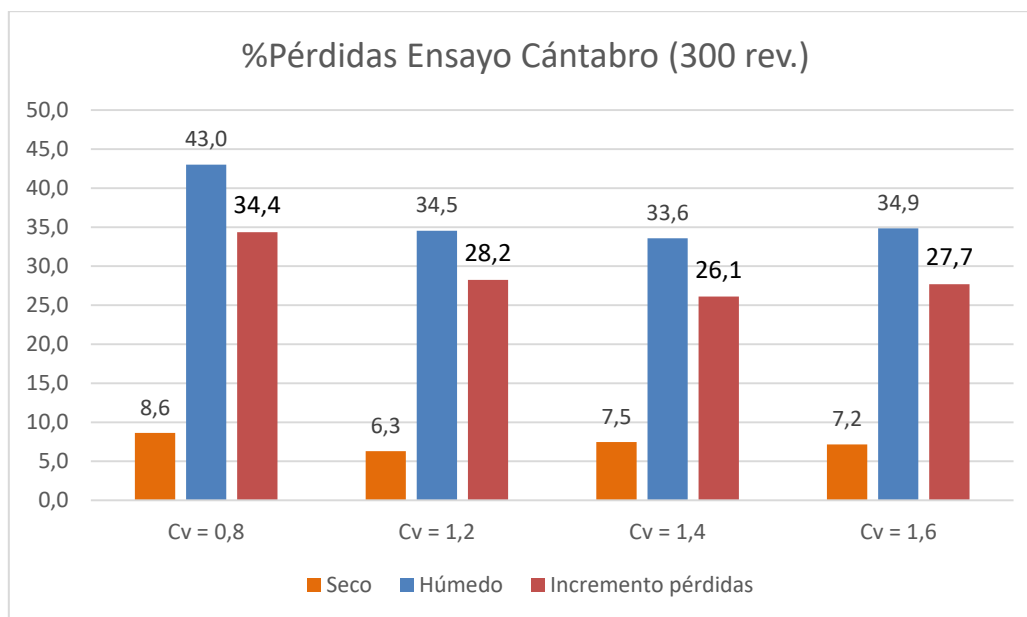


Figura 48 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)

5.2.8. Ceniza Gris

En la siguiente tabla se muestran las pérdidas en seco y tras inmersión para cada relación Cv/Cs estudiada, así como el incremento en pérdidas para las probetas fabricadas con ceniza gris.

C_v/C_s	0,6	0,8	1,0
En seco (%)	7,4	10,0	8,0
Tras inmersión (%)	37,8	34,1	27,3
Incremento (%)	30,4	24,1	19,3

Tabla 21 - Pérdidas al Cántabro - Ceniza Gris

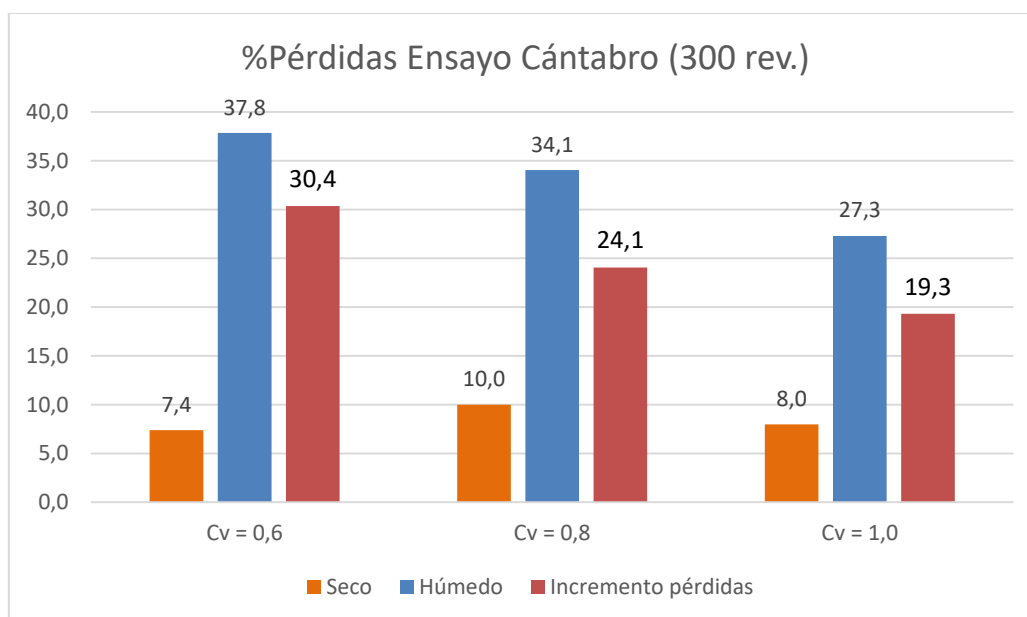


Figura 49 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ceniza Gris

5.2.9. Resumen

En la siguiente figura se muestran los incrementos de pérdidas para cada fíller según la relación volumétrica C_v/C_s

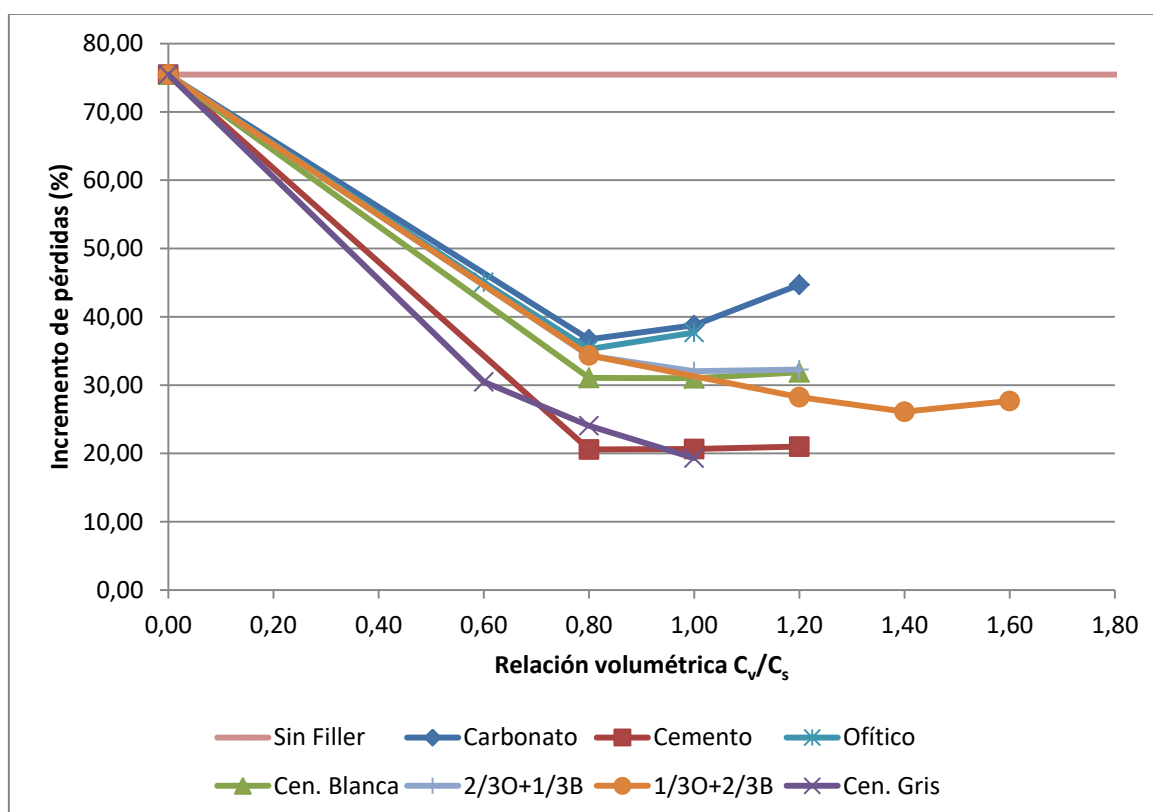


Figura 50 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica

Tal y como se dijo anteriormente, la mayoría de las mezclas presentan su mayor resistencia a la acción del agua cuando la relación C_v/C_s se encuentra entre 0,8 y 1,0, empezando a sufrir más pérdidas cuando la relación va más allá de 1,0 o es inferior a 0,8.

Se observa también que, a pesar de ser hoy en día uno de los fílleres más utilizados, el carbonato cálcico presenta los incrementos de pérdidas más elevados en relación al resto de fílleres estudiados. Esto muestra que otorga a la mezcla una peor resistencia a la acción del agua frente al resto de fílleres.

Tal y como se esperaba, el cemento presenta los incrementos de pérdidas menores, y otorga una mejor resistencia al agua.

Entre el carbonato cálcico y el cemento se encuentran el resto de fílleres. Cuanto más baja sea la curva, mejor es el comportamiento de la mezcla con ese fíller ante el agua, y cuanto más alta, peor.

En lo que respecta al fíller de recuperación (ofítico), este presenta un resultado muy similar al carbonato cálcico. A pesar de ser un fíller ácido, lo que a priori podría hacer pensar que mostraría un peor comportamiento y que su curva se situaría por encima del resto de fílleres, ha resultado comportarse algo mejor que el carbonato cálcico frente a la acción del agua.

Encontramos que las dos cenizas, principal objetivo de este estudio, otorgan una mejor resistencia al agua que el carbonato cálcico, situándose la ceniza blanca a medio camino del carbonato cálcico y el cemento, y la ceniza gris casi al mismo nivel que el cemento.

Finalmente, en lo que respecta a las combinaciones de fíller estudiadas (ceniza blanca y fíller de recuperación), muestran un comportamiento intermedio a cada uno de los fílleres por separado, según la proporción que se ha utilizado.

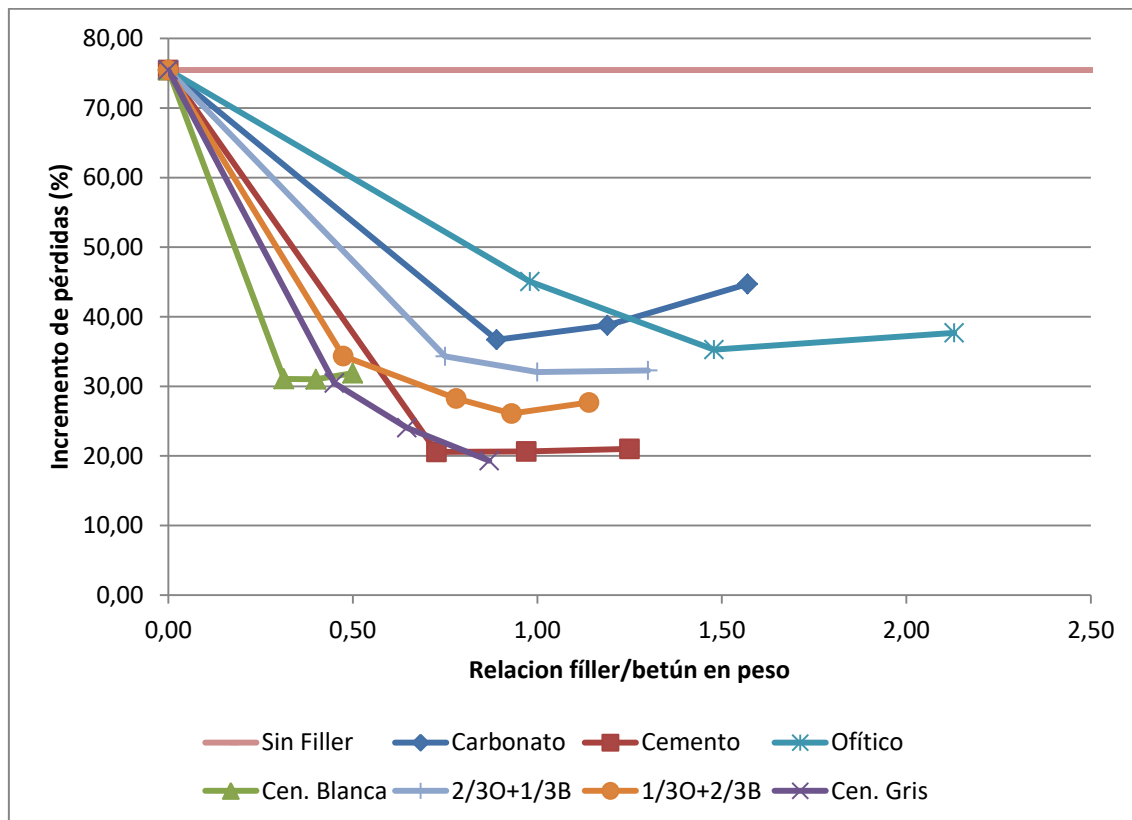


Figura 51 - Pérdidas al Cántabro según relación fíller/betún en peso

La misma figura puede ser representada enfrentando la variación de pérdidas y la relación ponderal filler/betún (f/b), en lugar de la relación C_v/C_s .

Se puede observar que la relación fíller/betún óptima, para la que se producen el menor incremento de pérdidas, varían enormemente según el fíller del que se trate, cosa que no ocurriría con las relaciones C_v/C_s óptimas.

Queda patente pues, el inconveniente que supone la especificación de una misma relación fíller/betún en peso, especialmente cuando se consideran filleres con pesos específicos muy diferentes. Es suficiente observar que la relación fíller/betún idónea para la ceniza blanca se encuentra entorno al 0,4, mientras que para el fíller ofítico la misma relación está en torno a 1,4.

6. Conclusiones

Del presente estudio se observa que tanto la ceniza blanca como la ceniza gris proporcionan a las mezclas bituminosas en caliente buena resistencia a la abrasión tras haber sufrido los efectos negativos de la humedad.

Los resultados obtenidos indican que las mezclas fabricadas con dichas cenizas, presentan una resistencia intermedia entre las que se obtienen mediante el uso del carbonato y cemento. Esto resulta muy interesante, pues en ciertos casos puede permitir la sustitución de productos comerciales por lo que a día de hoy son residuos, obteniendo mejores resultados en términos de resistencia al daño por humedad y a la abrasión.

Como se ha comentado, al fabricar las mezclas asfálticas en obra, no es posible quitar el 100% del polvo adherido al árido. Para las mezclas fabricadas con una combinación de ceniza blanca y ofítico se obtienen unos resultados intermedios entre los obtenidos cuando se utilizan dichos fílleres de forma independiente.

Los resultados obtenidos también nos indican que, combinando de forma correcta dos fílleres, se puede obtener una mezcla asfáltica con mejores propiedades que con únicamente la utilización de uno de esos fílleres.

Finalmente, como se ha comentado en varias ocasiones, queda patente la importancia de llevar a cabo la dosificación de fíller volumétricamente y no por peso, como se hace la mayoría de las veces.

7. Futuras líneas de investigación

Los resultados obtenidos en esta tesina muestran un prometedor futuro para la utilización de la ceniza blanca y la ceniza gris como fílleres, pero muchos más ensayos deben llevarse a cabo para mejor conocer como estos materiales afectan a las distintas propiedades de las mezclas bituminosas en caliente.

Primero, del mismo modo que se ha hecho con la ceniza blanca, sería interesante saber cómo se comporta la ceniza gris cuando se utiliza conjuntamente con el fíller de recuperación.

Debería también estudiarse como estas cenizas afectan a otras propiedades importantes de las mezclas asfálticas, como el módulo elástico, resistencia a fatiga, resistencia a la fisuración, deformación plástica, su sensibilidad a la temperatura, envejecimiento...

Otro punto importante es la lixiviación, pues no se puede permitir que ciertos componentes presentes en las cenizas, que podrían ser contaminantes, se disuelvan cuando la mezcla se ve expuesta al agua y éstas acaben en el medio.

Por último, en ambas cenizas se encuentra presente una cantidad importante de cal viva (CaO). La cal viva reacciona ante la presencia de agua y da lugar a cal muerta (Ca(OH)_2), que como ya se ha comentado en apartados anteriores, puede mejorar de forma significativa las características de las mezclas asfálticas. Si ese es el caso para las mezclas asfálticas fabricadas con ceniza blanca y ceniza gris, sería muy beneficioso provocar esta reacción durante la fabricación de la mezcla.

8. Referencias bibliográficas

- [1] Salil Mohan. "Thesis: Winter Damage of Porous Asphalt." TU Delft, 2010.
- [2] Molenaar JMM, Molenaar AAA. "An investigation into the contribution of the bituminous binder to the resistance to ravelling of porous asphalt." 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, 2000. Book 1 – session 1.
- [3] Voskuilen J, Tolman F and Rutten E, 2004. "Do Modified Porous Asphalt Mixtures have a longer Service life?" Eurobitume & Eurasphalt congress Vienna, 2004. Vol2.
- [4] Hagos ET. "The effect of aging on binder properties of porous asphalt concrete." PhD thesis, Delft University of Technology, the Netherlands, 2008.
- [5] Y.R. Kim, D.L. Little, I. Song. "Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation." Transportation Research Record. 2003, n. 1832, pp. 1–8.
- [6] A.F. Faheem, H.U. Bahia. "Conceptual Phenomenological Model for Interaction of Asphalt Binders with Mineral Fillers." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 2009 Vol. 78, 2009, 680–717.
- [7] B. J. Smith, S. Hesp. "Crack Pinning in Asphalt Mastic and Concrete: Regular Fatigue Studies." Transportation Research Record. 2000, n. 1728, 75–81.
- [8] B. Delaporte, H. Di Benedetto, P. Chaverot, G. Gauthier. "Effect of Ultrafine Particles on Linear Viscoelastic Properties of Mastics and Asphalt Concretes." Transportation Research Record. 2008, n. 2051, 41–48
- [9] A. Monteparra, E. Romero, M. Isola, G. Tebaldi. "The Role of Fillers on Cracking Behaviour of Mastics and Asphalt Mixtures." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 2011, vol. 80, 161-192
- [10] D. Lesueur, J. Petit, H. J. Ritter. "Increasing the Durability of Asphalt Mixtures by Hydrated Lime Addition: What Mechanisms?" Proceedings 5th Eurobitume & Eurasphalt Congress – Istanbul June 2012 – Paper 256
- [11] I. Ishai, J. Craus. "Effect of the Filler on Aggregate-Bitumen Adhesion Properties in Bituminous Mixtures." Proc. Association Asphalt Paving Technologists 43, 1977. pp.228-258
- [12] M. Buannic, J. Van Rompu, H. Di Benedetto, C. Ruot, T. Gallet. "Fatigue Life of Bitumen and Mastics – Analysis and Comparison of Different Criteria." Proceedings 5th Eurobitume & Eurasphalt Congress – Istanbul June 2012 – Paper 131
- [13] A. Yilmaz, I. Sutas. "Electric-Arc Furnace Slag Utilization in Hot Mix Asphalt." Proceedings 5th Eurobitume & Eurasphalt Congress – Istanbul June 2012 – Paper 377
- [14] R. Poursorkhabi, A. D. Osgouei. "Waste Phosphate in Hot Mix Asphalts to Improve Rutting Resistance." Proceedings 5th Eurobitume & Eurasphalt Congress – Istanbul June 2012 – Paper 535

- [15] A. R. Pasandín, I. Pérez, A. Ramírez, M. M. Cano. "Moisture Damage Resistance of Hot-Mix Asphalt Made with Paper Industry Wastes as Filler." *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 853-862
- [16] F. Pérez Jiménez, R. Miró Recasens, A. Martínez. "Effect of Filler Nature and Content on the Behaviour of Bituminous Mastics." *Road Materials and Pavement Design*. 2008, vol. 9, 417-431
- [17] M. Herrero, "Bachelor Thesis: Evaluación del uso de cenizas procedentes de la industria papeleras como fíller en la fabricación de mezclas bituminosas." UPC, 2017
- [18] Ingeniería de carreteras volumen I - Carlos Kraemer, José María Pardillo, Sandro Rocci, Manuel G. Romana, Víctor Sánchez Blanco, Miguel Ángel del Val. – McGRAW-HILL/INTERAMERICANA Editores, S.A.U. - España, Madrid. - Septiembre de 2003
- [19] Ingeniería de carreteras volumen II - Carlos Kraemer, José María Pardillo, Sandro Rocci, Manuel G. Romana, Víctor Sánchez Blanco, Miguel Ángel del Val. – McGRAW-HILL/INTERAMERICANA Editores, S.A.U. - España, Madrid. - Septiembre de 2003
- [20] Estudio, diseño y control de mezclas bituminosas – Félix Edmundo Pérez Jiménez, Rodrigo Miró Recasens, Adriana Martínez. – Asociación Española de la Carretera. – España, Madrid. – Junio 2006
- [21] Norma IRAM 1542/83, Argentina
- [22] UNE-EN 12697-35. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio (AENOR, 2006)
- [23] UNE-EN 12697-38. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 38: Aparatos de ensayo y calibración (AENOR, 2007)
- [24] UNE-EN 12697-30. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de la muestra mediante compactador por impactos (AENOR, 2006)
- [25] UNE-EN 12697-6. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático (AENOR, 2006)
- [26] NTL-168/90. Densidad de huecos en mezclas compactadas (CEDEX)
- [27] NTL-149/72. Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Ángeles. (CEDEX)

9. Índice de tablas

Tabla 1 - Resultados utilizando la cantidad de betún óptima respecto a la caliza [15]	9
Tabla 2 - Resultados de las mezclas fabricadas con cenizas volantes cuando la cantidad óptima se betún se calcula respecto a las mismas cenizas [15]	9
Tabla 3 - Granulometría del árido	14
Tabla 4 - Granulometría de los diferentes fílleres	15
Tabla 5 - Peso específico y concentración crítica de cada fíller.....	18
Tabla 6 - Relación ponderal fíller/betún para cada serie	19
Tabla 7 - Densidades y porcentaje de huecos - Carbonato Cálcico.....	26
Tabla 8 - Densidades y porcentaje de huecos – Cemento	27
Tabla 9 - Densidades y porcentaje de huecos – Ofítico	29
Tabla 10 - Densidades y porcentaje de huecos - Ceniza Blanca	30
Tabla 11 - Densidades y porcentaje de huecos - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3) ...	31
Tabla 12 - Densidades y porcentaje de huecos - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3) ...	32
Tabla 13 - Densidades y porcentaje de huecos - Ceniza Gris	34
Tabla 14 - - Densidades y porcentaje de huecos para todas las mezclas.....	35
Tabla 15 - Pérdidas al Cántabro - Carbonato Cálcico	36
Tabla 16 - Pérdidas al Cántabro – Cemento	37
Tabla 17 - Pérdidas al Cántabro - Ofítico.....	38
Tabla 18 - Pérdidas al Cántabro - Ceniza Blanca.....	38
Tabla 19 - Pérdidas al Cántabro - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3).....	39
Tabla 20 - Pérdidas al Cántabro - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3).....	40
Tabla 21 - Pérdidas al Cántabro - Ceniza Gris	40

10. Índice de figuras

Figura 1 - Ravelling en carretera [1]	1
Figura 2 - Módulo de elasticidad de las distintas mezclas [9]	5
Figura 3 - Resistencia a la tracción de las distintas mezclas [9]	5
Figura 4 - Efecto de la cal muerta en árido silíceo [11]	6
Figura 5 - Porosidad del fíller mineral (izquierda) y de la cal muerta (derecha) [10]	6
Figura 6 - Curvas de Wöhler para los 4 materiales [12]	7
Figura 7 - Densidad frente a concentración de fíller [13]	7
Figura 8 - Porcentaje de huecos frente a concentración de fíller [13]	8
Figura 9 - Relación entre deformación permanente y ciclos de carga [13]	8
Figura 10 - Módulo elástico de las distintas mezclas [15]	10
Figura 11 - Resistencia a deformación permanente de las distintas mezclas [15]	10
Figura 12 - Pérdidas al Cántabro respecto concentraciones volumétricas [16]	11
Figura 13 - Pérdidas al Cántabro respecto concentración fíller/betún en peso [16]	11
Figura 14 - Porcentaje de huecos respecto a relación volumétrica del contenido en fíller [16]	12
Figura 15 - Porcentaje de pérdidas al Cántabro [17]	12
Figura 16 - Curva granulométrica del árido	14
Figura 17 - Curva granulométrica de los diferentes fílleres	16
Figura 18 - Material necesario para realizar el ensayo de concentraciones críticas	17
Figura 19 - Laboratorio de asfaltos de la ETSECCPB	19
Figura 20 - Tamizadora	20
Figura 21 - Árido tamizado	20
Figura 22 - Árido calentado en estufa	20
Figura 23 - Zona de fabricación de probetas Marshall	21
Figura 24 - Compactadora de probetas Marshall	21
Figura 25 - Gato hidráulico de 5T	22
Figura 26 - Probetas desmoldadas	22
Figura 27 - Baño para la inmersión de probetas	24
Figura 28 - Máquina de Los Ángeles	24
Figura 29 - Densidades según relación volumétrica - Carbonato Cálcico	26
Figura 30 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Carbonato Cálcico	27
Figura 31 - Densidades según relación volumétrica - Cemento	28
Figura 32 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Cemento	28
Figura 33 - Densidades según relación volumétrica - Ofítico	29
Figura 34 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ofítico	29
Figura 35 - Densidades según relación volumétrica - Ceniza Blanca	30
Figura 36 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ceniza Blanca	30
Figura 37 - Densidades según relación volumétrica - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)	31
Figura 38 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)	32
Figura 39 - Densidades según relación volumétrica - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)	33
Figura 40 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)	33
Figura 41 - Densidades según relación volumétrica - Ceniza Gris	34
Figura 42 - Porcentaje de huecos según relación volumétrica - Ceniza Gris	34
Figura 43 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Carbonato Cálcico	37

Figura 44 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Cemento	37
Figura 45 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ofítico	38
Figura 46 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ceniza Blanca	39
Figura 47 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ceniza Blanca (1/3) + Ofítico (2/3)	39
Figura 48 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ceniza Blanca (2/3) + Ofítico (1/3)	40
Figura 49 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica - Ceniza Gris	41
Figura 50 - Pérdidas al Cántabro según relación volumétrica	41
Figura 51 - Pérdidas al Cántabro según relación fíller/betún en peso	42

Anejos

Se muestran a continuación los resultados del cálculo de concentraciones críticas, así como los resultados obtenidos de los ensayos para cada probeta.

Concentraciones Críticas

1/3 Ofita + 2/3 Ceniza Blanca

Muestra	1	2
Densidad	2,848	2,848
Masa	6,0	6,1
Volumen	11,75	11,5
Rc	0,179	0,186
Media	0,183	

Cv		0,8	1,2	1,4	1,6
1/3Of+2/3CB	Cv	0,183	0,220	0,256	0,293
	gr	19,2	31,5	37,9	46,4
	f/b	0,47	0,78	0,93	1,14
	gr Of	6,4	10,5	12,6	15,5
	gr CB	12,8	21,0	25,2	30,9

2/3 Ofita + 1/3 Ceniza Blanca

Muestra	1	2
Densidad	2,866	2,866
Masa	8,6	8,7
Volumen	11,25	11,5
Rc	0,267	0,264
Media	0,265	

Cv		0,8	1,0	1,2
2/3Of+1/3CB	Cv	0,212	0,265	0,318
	gr	30,3	40,6	52,6
	f/b	0,75	1,00	1,30
	gr Of	20,2	27,1	35,0
	gr CB	10,1	13,5	17,5

Sin filler

CÁLCULO DENSIDADES GEOMÉTRICAS

Diámetro 101,6

SIN FILLER						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	55,7	56,0	56,1	55,9	928,8	2,048
2	55,0	55,3	55,3	55,2	911,4	2,037
3	55,9	55,8	55,9	55,9	933,1	2,060
4	55,6	55,6	55,6	55,6	933,7	2,071
5	55,1	55,1	54,9	55,0	935,3	2,096
6	55,9	56,2	55,9	56,0	927,2	2,042
MEDIA						2,059

RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO CON PROBETAS UCL

Revoluciones 300 Temperatura 25°C

	SIN FILLER								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos	
HÚMEDO	3	947,0	134,7	85,8	86,2	4,43	0,05	24,76	
	4	950,1	87,4	90,8				24,35	
	5	948,2	170,9	82,0				23,44	
SECO	1	930,0	825,2	11,3	10,7	0,53	0,05	25,20	
	2	912,8	819,6	10,2				25,62	
	6	928,2	829,1	10,7				25,42	
								MEDIA	24,80

Carbonato

CÁLCULO DENSIDADES GEOMÉTRICAS

CARBONATO CÁLCICO 36,0g - Cv = 0,8						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	57,8	57,2	57,2	57,4	969,6	2,084
2	58,3	57,0	57,2	57,5	961,5	2,063
3	57,6	57,5	57,6	57,6	970,1	2,079
4	57,3	56,9	57,1	57,1	966,7	2,088
5	57,1	57,2	58,0	57,4	971,3	2,086
6	57,4	56,8	56,9	57,0	968,7	2,095
CARBONATO CÁLCICO 48,1g - Cv = 1,0						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	55,6	56,0	55,6	55,7	971,0	2,149
2	55,6	55,9	55,8	55,8	974,8	2,156
3	56,3	56,2	56,4	56,3	981,2	2,150
4	55,7	55,5	55,9	55,7	983,2	2,177
5	55,6	55,1	54,8	55,2	966,9	2,162
6	56,3	56,3	56,3	56,3	986,3	2,161
CARBONATO CÁLCICO 63,4g - Cv = 1,2						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	55,7	55,6	55,7	55,7	986,2	2,185
2	56,7	56,7	57,0	56,8	1003,5	2,179
3	56,6	56,3	56,6	56,5	996,8	2,176
4	56,2	56,3	56,6	56,4	994,4	2,176
5	56,9	56,7	56,8	56,8	998,6	2,169
6	56,2	56,2	56,5	56,3	991,7	2,173

RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO CON PROBETAS UCL

	CARBONATO CÁLCICO 36,0g - Cv = 0,8							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	1	992,4	542,6	45,3	43,4	1,99	0,05	23,89
	3	994	583	41,3				24,07
	4	990,5	558,7	43,6				23,72
SECO	2	964,1	894,8	7,2	6,7	1,08	0,16	24,66
	5	973,8	920,5	5,5				23,80
	6	971,2	898,6	7,5				23,47
	CARBONATO CÁLCICO 48,1g - Cv = 1,0							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	2	998,7	550,1	44,9	43,8	1,10	0,03	21,45
	5	992,0	568,0	42,7				20,68
	6	1008,8	569,0	43,6				21,24
SECO	1	972,1	925,4	4,8	4,9	1,10	0,22	21,71
	3	982,3	943,0	4,0				21,69
	4	984,3	923,5	6,2				21,28
	CARBONATO CÁLCICO 63,4g - Cv = 1,2							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	2	1024,4	485,5	52,6	52,0	0,98	0,02	20,23
	3	1018,4	500,7	50,8				20,56
	4	1015,9	482,9	52,5				20,69
SECO	1	987,2	903,3	8,5	7,3	1,08	0,15	20,45
	5	999,8	931,4	6,8				20,56
	6	992,6	928,4	6,5				20,84

Cemento

CÁLCULO DENSIDADES GEOMÉTRICAS

CEMENTO 29,5g - Cv = 0,8						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	57,4	57,5	57,5	57,5	960,5	2,062
2	56,6	56,5	56,8	56,6	940,1	2,048
3	58,2	58,3	58,2	58,2	976,4	2,068
4	57,8	57,7	58,1	57,9	969,1	2,066
5	56,5	56,2	56,3	56,3	954,3	2,089
6	56,8	56,4	56,5	56,6	946,7	2,064
CEMENTO 39,3g - Cv = 1,0						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	55,1	55,1	54,9	55,0	951,9	2,133
2	56,0	56,0	55,8	55,9	965,0	2,128
3	56,1	55,6	55,9	55,9	960,5	2,121
4	56,3	56,2	56,1	56,2	966,4	2,121
5	57,3	56,9	57,0	57,1	982,9	2,124
6	56,5	56,3	56,5	56,4	972,4	2,125
CEMENTO 50,5g - Cv = 1,2						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	56,7	56,6	56,7	56,7	981,7	2,137
2	56,6	56,2	56,4	56,4	980,2	2,144
3	56,2	56,2	56,4	56,3	974,4	2,136
4	55,4	55,2	55,5	55,4	957,2	2,132
5	57,9	57,8	57,6	57,8	1013,6	2,164
6	55,5	55,6	55,7	55,6	981,3	2,177

RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO CON PROBETAS UCL

CEMENTO 29,5g - Cv = 0,8								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	2	956,4	680,8	28,8	27,9	6,27	0,22	24,69
	4	987,3	654,5	33,7				24,45
	5	972,2	765,5	21,3				24,54
SECO	1	963,2	886	8,0	7,5	0,74	0,10	25,21
	3	979,3	914,6	6,6				23,67
	6	949,5	876,1	7,7				24,59
CEMENTO 39,3g - Cv = 1,0								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	2	989,7	637,9	35,5	30,3	5,46	0,18	22,47
	5	1011,7	762,3	24,7				22,73
	6	999,2	692,0	30,7				22,60
SECO	1	954,6	881,0	7,7	6,9	0,71	0,10	22,28
	3	962,9	902,2	6,3				22,74
	4	968,7	899,6	7,1				22,57
CEMENTO 50,5g - Cv = 1,2								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	1003,7	734,9	26,8	23,7	3,51	0,15	21,99
	4	983,5	788,0	19,9				22,02
	6	1007,2	761,1	24,4				20,53
SECO	1	984,1	933,7	5,1	5,6	1,80	0,32	21,75
	2	982,7	908,2	7,6				22,16
	5	1016,2	974,8	4,1				20,99

Ofítico

CÁLCULO DENSIDADES GEOMÉTRICAS

Ofitic 39,7gr - Cv = 0,6						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	56,7	55,8	55,5	56,0	960,3	2,115
2	54,8	54,5	54,7	54,7	945,1	2,132
3	56,9	56,8	57,1	56,9	988,8	2,142
4	56,7	56,8	56,9	56,8	981,7	2,132
5	55,9	56,2	55,9	56,0	974,6	2,147
6	56,2	55,9	55,9	56,0	973,9	2,145
Ofitic 59,9g - Cv = 0,8						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	57,6	57,0	56,9	57,2	998,4	2,154
2	56,5	56,7	56,5	56,6	989,0	2,157
3	56,2	55,9	56,1	56,1	979,5	2,155
4	56,2	55,8	56,1	56,0	980,0	2,157
5	56,6	56,4	56,4	56,5	987,2	2,156
6	55,6	55,4	55,4	55,5	968,7	2,154
Ofitic 86,3gr - Cv = 1,0						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	57,5	56,5	56,9	57,0	1020,0	2,209
2	56,4	56,6	56,4	56,5	1017,1	2,222
3	57,4	57,3	57,2	57,3	1024,5	2,205
4	56,5	56,3	56,3	56,4	1020,7	2,234
5	56,5	56,7	56,5	56,6	1015,6	2,215
6	56,3	56,3	56,5	56,4	1009,3	2,209

RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO CON PROBETAS UCL

	Ofitic 39,7gr - Cv = 0,6							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	2	964,1	477,8	50,4	52,2	1,69	0,03	22,74
	3	1018,7	483,9	52,5				21,75
	4	997,9	461,1	53,8				22,13
SECO	1	961,2	889,0	7,5	7,2	0,27	0,04	22,10
	5	975,4	906,2	7,1				21,59
	6	974,8	906,6	7,0				21,64
	Ofitic 59,9g - Cv = 0,8							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	1016,1	483,1	52,5	45,3	6,25	0,14	21,44
	5	1017,2	599,9	41,0				21,41
	6	998,1	575,3	42,4				21,44
SECO	1	999,3	938,6	6,1	6,3	0,52	0,08	21,52
	2	989,9	929,1	6,1				21,50
	4	980,9	912,1	7,0				21,52
	Ofitic 86,3gr - Cv = 1,0							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	1053,0	585,5	44,4	44,2	0,35	0,01	19,38
	4	1039,6	578,0	44,4				19,49
	6	1030,4	579,1	43,8				19,37
SECO	1	1020,8	956,5	6,3	6,5	0,22	0,03	18,90
	2	1018,0	952,0	6,5				18,46
	5	1016,5	948,1	6,7				19,16

C. Blanca

CÁLCULO DENSIDADES GEOMÉTRICAS

CENIZA BLANCA 12,6g - Cv = 0,8						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	56,4	56,3	57,0	56,6	937,3	2,044
2	56,9	56,8	56,5	56,7	936,8	2,037
3	57,8	57,2	57,0	57,3	936,5	2,015
4	57,9	57,2	57,0	57,4	945,2	2,032
5	57,6	57,8	57,5	57,6	942,9	2,018
6	58,1	58,2	57,4	57,9	949,2	2,022
CENIZA BLANCA 16,3g - Cv = 1,0						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	55,3	55,3	55,4	55,3	951,9	2,122
2	56,3	56,2	56,6	56,4	965,0	2,112
3	56,1	56,2	56,2	56,2	960,5	2,109
4	56,4	56,6	56,5	56,5	966,4	2,110
5	55,5	55,6	55,7	55,6	982,9	2,181
6	56,1	56,6	56,5	56,4	972,4	2,127
CENIZA BLANCA 20,2g - Cv = 1,2						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	56,2	56,3	56,4	56,3	981,7	2,151
2	56,7	56,6	56,8	56,7	980,2	2,132
3	56,5	56,6	56,8	56,6	974,4	2,122
4	56,5	56,9	56,6	56,7	957,2	2,084
5	57,2	57,1	57,2	57,2	1013,6	2,187
6	56,3	56,6	56,4	56,4	981,3	2,145

RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO CON PROBETAS UCL

CENIZA BLANCA 12,6g - Cv = 0,8								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	1	969,9	580,5	40,1	40,3	1,50	0,04	25,34
	3	969,4	563,8	41,8				26,40
	6	983	601,1	38,9				25,76
SECO	2	939,4	862,8	8,2	9,2	1,06	0,12	25,60
	4	947,9	860,5	9,2				26,29
	5	945,5	848,3	10,3				26,14
CENIZA BLANCA 16,3g - Cv = 1,0								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	974,4	576,6	40,8	39,4	1,54	0,04	23,07
	4	978,5	591,5	39,6				23,14
	5	975,3	607,0	37,8				20,56
SECO	1	939,2	858,5	8,6	8,3	0,86	0,10	22,70
	2	943,0	857,2	9,1				23,16
	6	952,3	881,6	7,4				22,53
CENIZA BLANCA 20,2g - Cv = 1,2								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	4	985,0	572,0	41,9	39,8	2,42	0,06	21,49
	5	993,3	624,4	37,1				22,53
	6	974,7	583,0	40,2				21,70
SECO	1	948,4	870,2	8,2	7,9	0,78	0,10	22,16
	2	951,0	884,8	7,0				23,94
	3	947,5	868,1	8,4				20,16

2/30+1/3B

CÁLCULO DENSIDADES GEOMÉTRICAS

2/3 OFITA + 1/3 CENIZA BLANCA 30,3 gr - Cv = 0,8						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	55,6	56,1	55,5	55,7	943,9	2,089
2	57,1	56,4	57,5	57,0	960,2	2,078
3	57,3	56,4	56,3	56,7	956,4	2,082
4	57,0	57,1	57,6	57,2	970,8	2,092
5	55,0	55,1	55,2	55,1	961,0	2,151
6	56,4	56,7	56,8	56,6	966,3	2,105
2/3 OFITA + 1/3 CENIZA BLANCA 40,6 gr - Cv = 1,0						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	57,5	57,4	57,1	57,3	980,8	2,110
2	56,9	56,7	56,3	56,6	977,4	2,129
3	56,5	56,7	56,5	56,6	973,4	2,123
4	57,6	56,5	56,3	56,8	971,7	2,110
5	56,2	56,4	56,2	56,3	971,8	2,130
6	57,0	56,4	56,7	56,7	971,4	2,113
2/3 OFITA + 1/3 CENIZA BLANCA 52,6 gr - Cv = 1,2						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	57,0	57,4	57,2	57,2	990,4	2,136
2	57,2	56,7	57,3	57,1	987,5	2,134
3	57,4	57,0	57,1	57,2	985,6	2,127
4	56,6	56,7	56,9	56,7	987,3	2,147
5	57,0	57,8	57,1	57,3	988,4	2,128
6	56,9	56,9	57,4	57,1	985,9	2,131

RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO CON PROBETAS UCL

2/3 OFITA + 1/3 CENIZA BLANCA 30,3 gr - Cv = 0,8								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	2	992,4	569,0	42,7	42,3	2,78	0,07	23,69
	3	991,0	600,3	39,4				23,96
	5	990,2	545,1	45,0				23,57
SECO	1	944,4	865,1	8,4	8,0	1,31	0,16	24,10
	4	971,4	882,9	9,1				21,42
	6	966,8	903,2	6,6				23,12
2/3 OFITA + 1/3 CENIZA BLANCA 40,6 gr - Cv = 1,0								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	1005,3	590,8	41,2	39,8	1,60	0,04	22,45
	5	1004,1	621,9	38,1				23,13
	6	1003,3	601,7	40,0				22,39
SECO	1	981,5	908,4	7,4	7,7	0,37	0,05	23,13
	2	978,0	901,1	7,9				22,68
	4	972,1	892,5	8,2				23,02
2/3 OFITA + 1/3 CENIZA BLANCA 52,6 gr - Cv = 1,2								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	1018,2	615,5	39,6	40,5	1,74	0,04	22,04
	4	1019,8	618,5	39,4				22,37
	5	1021,6	587,9	42,5				22,21
SECO	1	991,0	912,5	7,9	8,2	0,49	0,06	22,08
	2	988,0	910,5	7,8				21,64
	6	986,5	900,4	8,7				22,33

1/30+2/3B

CÁLCULO DENSIDADES GEOMÉTRICAS

1/3 OFITA + 2/3 CENIZA BLANCA 19,2 gr - Cv = 0,8						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	56,0	55,5	55,6	55,7	943,4	2,089
2	56,2	55,8	56,0	56,0	946,4	2,085
3	56,0	56,0	56,2	56,1	943,9	2,077
4	56,1	56,0	56,1	56,1	962,1	2,117
5	56,5	55,5	56,2	56,1	951,6	2,093
6	56,7	56,8	56,6	56,7	957,7	2,083
1/3 OFITA + 2/3 CENIZA BLANCA 31,5 gr - Cv = 1,2						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	56,2	55,9	56,0	56,0	959,8	2,113
2	56,4	56,3	56,2	56,3	965,8	2,116
3	57,0	57,1	56,8	57,0	972,5	2,106
4	56,0	55,8	55,9	55,9	964,4	2,128
5	56,4	56,3	56,2	56,3	966,9	2,118
6	56,0	55,7	55,6	55,8	961,1	2,126
1/3 OFITA + 2/3 CENIZA BLANCA 37,9 gr - Cv = 1,4						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	56,3	56,4	56,7	56,5	978,5	2,137
2	56,0	56,2	55,9	56,0	971,2	2,138
3	56,4	56,5	56,6	56,5	976,0	2,131
4	56,4	56,1	56,0	56,2	975,1	2,141
5	62,2	61,9	61,9	62,0	1055,4	2,100
6	56,4	56,4	56,3	56,4	972,0	2,127

1/3 OFITA + 2/3 CENIZA BLANCA 46,4 gr - Cv = 1,6						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	56,0	56,4	56,2	56,2	978,2	2,147
2	56,8	57,0	57,0	56,9	980,9	2,125
3	56,4	56,4	56,4	56,4	982,5	2,149
4	56,5	56,5	56,8	56,6	983,3	2,143
5	56,7	57,0	57,1	56,9	982,2	2,128
6	56,5	56,8	56,9	56,7	984,3	2,140

RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO CON PROBETAS UCL

1/3 OFITA + 2/3 CENIZA BLANCA 19,2 gr - Cv = 0,8								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	2	975,5	554,8	43,1	43,0	0,11	0,00	23,69
	3	975,0	556,5	42,9				24,15
	4	978,0	557,7	43,0				22,68
SECO	1	944,3	853,0	9,7	8,6	0,89	0,10	23,85
	5	952,5	874,5	8,2				23,53
	6	958,7	881,2	8,1				23,90
1/3 OFITA + 2/3 CENIZA BLANCA 31,5 gr - Cv = 1,2								
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	1003,7	646,7	35,6	34,5	1,61	0,05	22,92
	4	995,2	669,9	32,7				22,48
	5	997,7	644,9	35,4				22,83
SECO	1	960,0	901,4	6,1	6,2	0,75	0,12	23,03
	2	965,7	897,0	7,1				23,29
	6	961,2	906,8	5,7				22,56

	1/3 OFITA + 2/3 CENIZA BLANCA 37,9 gr - Cv = 1,4							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	2	1001,2	691,7	30,9	33,6	3,33	0,10	21,97
	4	1003,9	677,4	32,5				22,22
	5	1089,9	683,2	37,3				22,35
SECO	1	978,5	898,6	8,2	7,5	1,00	0,13	21,96
	3	976,2	898,6	7,9				21,83
	6	972,0	910,5	6,3				23,35
	1/3 OFITA + 2/3 CENIZA BLANCA 46,4 gr - Cv = 1,6							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	1010,8	680,0	32,7	34,9	1,94	0,06	21,90
	5	1010,7	641,4	36,5				21,04
	6	1014,0	656,2	35,3				21,25
SECO	1	978,3	911,4	6,8	7,2	0,62	0,09	21,10
	2	980,9	914,5	6,8				21,80
	4	983,3	905,9	7,9				21,36

C. Gris

CÁLCULO DENSIDADES GEOMÉTRICAS

CENIZA GRIS 18,3g - Cv = 0,6						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	55,4	55,3	55,4	55,4	937,7	2,089
2	56,5	56,3	56,5	56,4	953,9	2,085
3	56,3	56,0	56,1	56,1	952,3	2,093
4	56,0	55,8	55,9	55,9	951,6	2,100
5	54,5	53,8	55,1	54,5	901,0	2,040
6	55,9	55,9	56,0	55,9	946,3	2,087
CENIZA GRIS 26,2g - Cv = 0,8						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	56,7	56,6	56,8	56,7	951,0	2,069
2	57,0	56,8	57,4	57,1	960,0	2,075
3	56,3	56,3	56,2	56,3	950,6	2,084
4	58,0	57,5	58,1	57,9	966,2	2,059
5	57,3	57,0	56,7	57,0	961,0	2,080
6	56,5	56,8	56,3	56,5	954,1	2,082
CENIZA GRIS 35,3g - Cv = 1,0						
REFERENCIA	H1	H2	H3	Hm	PESO	DENSIDAD
1	57,1	57,1	57,0	57,1	975,2	2,108
2	56,6	56,3	56,4	56,4	968,3	2,116
3	56,3	56,4	56,4	56,4	970,6	2,124
4	56,6	56,3	56,4	56,4	966,1	2,112
5	56,8	57,0	56,8	56,9	971,6	2,107
6	56,7	56,7	56,8	56,7	968,4	2,105

RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO CON PROBETAS UCL

	CENIZA GRIS 18,3g - Cv = 0,6							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	983,7	629,1	36,0	37,8	1,56	0,04	23,69
	4	983,7	603,0	38,7				23,56
	5	930,7	569,7	38,8				23,30
SECO	1	939,2	866,6	7,7	7,4	1,29	0,17	23,84
	2	955,6	898,7	6,0				25,47
	6	948,0	867,8	8,5				23,77
	CENIZA GRIS 26,2g - Cv = 0,8							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	2	989,4	630,1	36,3	34,1	3,77	0,11	24,41
	3	985,3	629,1	36,2				24,97
	4	997,4	701,2	29,7				24,24
SECO	1	953,9	855,9	10,3	9,9	0,25	0,03	24,63
	5	963,7	869,5	9,8				24,08
	6	956,9	861,7	9,9				24,16
	CENIZA GRIS 35,3g - Cv = 1,0							
	REFERENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	%PÉRDIDAS	MEDIA	σ	Cv	Huecos
HÚMEDO	3	990,9	735,9	25,7	27,3	1,35	0,05	23,05
	5	1002,5	720,9	28,1				22,47
	6	998,1	718,0	28,1				23,14
SECO	1	976,7	895,3	8,3	8,0	1,03	0,13	22,74
	2	969,6	903,5	6,8				22,92
	4	967,8	882,8	8,8				23,07